Vol. 14, No. 4, 2022, pp. 1–29 ISSN (Print): 2008-7306 ISSN (Online): 2423-5865

Journal of Economic Geology

https://econg.um.ac.ir

RESEARCH ARTICLE 10.22067/ECONG.2021.69859.1015 OPEN ACCESS

Geology, geochemistry, fluid inclusion and genesis of the Arabshah magnetite-apatite mineralization, SE Takab

Mir Ali Asghar Mokhtari [1*], Hossein Kouhestani [2], Soheila Aghajani Marsa [3]

[1] Associate Profesor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran
[2] Associate Profesor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran
[3] M.Sc., Mineralogy Lab., Iran Mineral Processing Research Center (IMPRC), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 15 April 2021
Revised: 20 September 2021
Accepted: 26 September 2021

Keywords

Magnetite-apatite mineralization
Rare earth elements
Kiruna-type
Arabshah
Takab

***Corresponding author**

Mir Ali Asghar Mokhtari
✉ amokhtari@znu.ac.ir

ABSTRACT

The Arabshah Fe mineralization is the only known magnetite-apatite mineralization at the Takab–Takht-e-Soleyman–Angouran subzone in southeast of Takab. The oldest rock units in the mineralization area include sedimentary succession of the Qom Formation that was intruded by the Pliocene Ayoub Ansar volcanic dome. Magnetite- apatite mineralization at the Arabshah occurs as vein-veinlets with E-W stright within the Ayoub Ansar dacitic dome. Brecciated zones containing narrow magnetite vein- veinlets occur at footwall and hanging wall of the main vein. Hydrothermal alterations include sodic-calcic, silicification and argillic. Magnetite is the only ore mineral in this mineralization which is accompanied with apatite, clinopyroxene, albite and quartz as gangue minerals. Mineralization textures in the Arabshah deposit include vein-veinlet, brecciated, disseminated, and replacement. REEs concentration within apatite crystals are more than 1%, and demonstrate LREE enrichment with high LREE/HREE ratio and distinctive negative Eu anomalies which is indicative for Kiruna- type iron ores. The result of fluid inclusion studies indicates the presence of two-phase and poly-phase inclusions include LV, VL, LVH, LVS and LVHS fluid inclusions with homogenization between 230-550 °C. The salinity of halite bearing poly-phase fluid vary between 35-60 wt.% NaCl equiv. Fluid inclusion data indicates that Arabshah magnetite-apatite mineralization originated from magmatic fluids. Evidences like mineral assemblages, hydrothermal alteration, ore structure and textures, geochemical characteristics and fluid inclusion data, indicate that the Arabshah magnetite-apatite mineralization can be classified as Kiruna-type iron ores.

How to cite this article

Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H. and Aghajani Marsa, S., 2022. Geology, geochemistry, fluid inclusion and genesis of the Arabshah magnetite-apatite mineralization, SE Takab. Journal of Economic Geology, 14(4): 1–29. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/ECONG.2021.69859.1015

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Iron oxide-apatite deposits (IOA) are considered to be Kiruna-type iron ores which have formed between Protrozoic to Tertiary eras in different parts of the world. Apatite occurs as a major constituent of these deposits which is accompanied by magnetite and some actinolite. Higher concentration of REEs is one of the important features of these deposits (Frietsch and Perdahl, 1995). The Arabshah Fe mineralization is the only known magnetite-apatite mineralization at the Takab–Takht-e-Soleyman–Angouran subzone within the Sanandaj-Sirjan zone which is located about 15 km southeast of Takab. During the past years, some exploration works were done on the Arabshah Fe mineralization, but its geological characteristics, mineralogy, texture, geochemistry, characteristics of mineralized fluids and genesis have not been studied yet. Recognition of characteristics of the Arabshah magnetite-apatite deposit as the first explored deposit of the Kiruna type mineralization in the Takab area is useful for exploration of this type of mineralization in NW Iran.

Materials and methods

This research study can be divided into two parts including field and laboratory studies. Field work includes recognition of different lithological units and ore veins along with sampling for laboratory studies. During field work, 34 samples were selected for petrographical, mineralogical and analytical studies. 10 thin sections and 5 thin-polished sections were used for petrographical and mineralogical studies. For geochemical studies, 6 samples from ore vein were analyzed by ICP–MS methods at the Geological Research Center, Karaj, Iran. Microthermometric measurements were performed on 2 samples using a Linkam THMS-600 heating–freezing stage attached to a ZIESS microscope in the fluid inclusion laboratory of the Iran Minerals Processing Research Center.

Results

The oldest rock units in the Arabshah area include Oligo-Miocene sedimentary succession of the Qom Formation that was intruded by the E–W-trending Pliocene Ayoub Ansar volcanic dome. Based on petrographic studies, the Ayoub Ansar volcanic dome has porphyritic, felsophyric and glomeroporphyritic textures and it is composed of plagioclase, amphibole and some quartz and K-feldspar phenocrysts set in a quartz-felspathic groundmass, and it is compositionally classified as dacite-rhyodacite. These rocks have medium-K calc-alkaline affinity and are classified as metaluminous I-type granitoids. They have been formed in an active continental margin to post-collisional tectonic setting and demonstrate geochemical characteristics similar to high silica adakites (Sabzi et al., 2018).

Fe mineralization at the Arabshah mineralization occurs as vein-veinlets of magnetite-apatite within the Ayoub Ansar dacitic dome. Brecciated zones occur at footwall and hanging wall of the main vein. The ore vein has east- west trend and crops out in 50 m length and maximum 1 m width. Coarse-grained euhedral apatite crystals are mainly present at the margins of the main vein. Hydrothermal alterations around the mineralized veins include sodic-calcic, silicification and argillic alterations. Mineralogically, the ore minerals include magnetite along with apatite, clinopyroxene, albite and quartz as gangue minerals. Goethite was formed during supergene alteration. Mineralization textures in the Arabshah deposit include vein-veinlet, brecciated, disseminated, and replacement form. Apatite crystals have high concentrations of REEs (about 1%). Condrite-normalized REE patterns for apatite crystals, magnetite-apatite ores and magnetite ore without or with minor apatite demonstrate LREE enrichment with high LREE/HREE ratio and distinctive negative Eu anomalies.

Based on phase relationships at room temperature, three types of fluid inclusion including two-phase (LV and VL), three-phase (LVH and LVS) and polyphase (LVHS) are present within the apatite crystals at the Arabshah mineralization. Microthermometric measurements indicate that LV and VL fluid inclusions have homogenized between 253-550 °C and 363-490 °C, respectively. Tree-phase LVH fluid inclusions have been homogenized between 278-508 °C and have salinities between 35-59.8 wt.% NaCl equiv. Three-phase LVS fluid inclusions have been homogenized between 240-520 °C. Polyphase LVHS fluid inclusions have been homogenized between 230-520 °C and have salinities between 36-59 wt.% NaCl equiv.

Discussion

Similar REE patterns of apatite crystals and

 DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

mineralized samples with samples from host dacitic dome demonstrate a genetic link between magnetite-apatite mineralization and dacites. Furthermore, REE patterns of the Arabshah mineralization is similar to other iron oxide-apatite deposits from the Tarom–Hashtjin metallogenic belt (Mokhtari et al., 2018), and those of Central Iranian iron ores (Mokhtari et al., 2013). Moreover, REE patterns of the Arabshah deposit are similar to REE patterns of the Kiruna-type iron ores (Frietsch and Perdahle, 1995).

Fluid inclusion data indicates that Arabshah magnetite-apatite mineralization originated from magmatic fluids. Positive correlations between salinity and homogenization temperatures indicate that mineralization at the Arabshah deposit involved mixing of magmatic fluids and a dilute and cooler meteoric fluid.

Totally, based on mineral assemblages, hydrothermal alteration, textures, geochemical characteristics and fluid inclusion data, the Arabshah magnetite-apatite mineralization can be classified to be of the Kiruna-type iron ores.

Acknowledgment

This research study was made possible by a grant from the office of vice-chancellor of research and technology, University of Zanjan. We hereby acknowledge their generous support. The Journal of Economic Geology reviewers and editor are also thanked for their constructive comments.

دوره ۱۴، شماره ۴، ۱۴۰۱، صفحه ۱ تا ۲۹ شاپا چاپی: ۷۳۰۶-۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۵۸۶۵-۲۴۲۳

زمین‌شناسی اقتصادی
https://econg.um.ac.ir

مقاله پژوهشی 10.22067/ECONG.2021.69859.1015 OPEN ACCESS

زمین‌شناسی، زمین‌شیمی، میان‌بارهای سیال و منشأ کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه، جنوب‌خاور تکاب

میر علی اصغر مختاری [۱] *، حسین کوهستانی [۲]، سهیلا آقاجانی مرسا [۳]

[۱] دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

[۲] دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

[۳] کارشناسی ارشد، آزمایشگاه کانی‌شناسی، مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴

واژه‌های کلیدی

کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت
عناصر کمیاب خاکی
نوع کایرونا
عربشاه
تکاب

نویسنده مسئول

میر علی اصغر مختاری
amokhtari@znu.ac.ir

چکیده

کانه‌زایی آهن عربشاه تنها کانه‌زایی شناخته‌شده از نوع مگنتیت- آپاتیت در زیرپهنه تکاب- تخت‌سلیمان- انگوران، در جنوب‌خاور شهر تکاب است. قدیمی‌ترین واحد سنگی در منطقه کانه‌زایی عبارت است از توالی رسوبی معادل سازند قم که گنبد داسیتی ایوب انصار به سن پلیوسن به داخل آن نفوذکرده است. کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه به صورت رگه- رگچه‌ای با راستای خاوری- باختری در داخل گنبد داسیتی رخنمون دارد. پهنه برشی حاوی رگه- رگچه‌های باریک مگنتیتی در کمرپایین و کمربالای رگه اصلی مشاهده می‌شود. دگرسانی‌های موجود شامل انواع سدیک- کلسیک، سیلیسی و آرژیلیک است. مگنتیت تنها کانه موجود در کانه‌زایی است که با کانی‌های باطله آپاتیت، کلینوپیروکسن، آلبیت و کوارتز همراهی می‌شود. ساخت و بافت‌های موجود شامل رگه- رگچه‌ای، برشی، دانه‌پراکنده و جانشینی هستند. محتوای مجموع عناصر کمیاب خاکی در بلورهای آپاتیت بیش از یک درصد بوده و یک الگوی پرشیب غنی از عناصر کمیاب خاکی سبک با نسبت بالای LREE/HREE به همراه آنومالی منفی Eu را نشان می‌دهند که از ویژگی‌های کانسارهای آهن نوع کایروناست. داده‌های به دست آمده از بررسی میان‌بارهای سیال بیانگر حضور میان‌بارهای دوفازی و چندفازی نوع LV، VL، LVS، LVH و LVHS با دمای همگن‌شدن بین ۲۳۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد است. شوری میان‌بارهای چندفازی حاوی هالیت بین ۳۵ تا ۶۰ درصد وزنی معادل نمک طعام متغیر است. داده‌های میان‌بارهای سیال بیانگر سیال ماگمایی برای تشکیل کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه هستند. شواهدی نظیر مجموعه کانی‌شناسی، دگرسانی سنگ دیواره، ساخت و بافت ماده معدنی، زمین‌شیمی و داده‌های میان‌بارهای سیال نشان می‌دهد که کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه در دسته کانسارهای آهن نوع کایرونا قرار می‌گیرد.

استناد به این مقاله

مختاری، میر علی اصغر؛ کوهستانی، حسین و آقاجانی مرسا، سهیلا ، ۱۴۰۱. زمین‌شناسی، زمین‌شیمی، میان‌بارهای سیال و منشأ کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه، جنوب‌خاور تکاب. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۴(۴): ۱-۲۹. https://doi.org/10.22067/ECONG.2021.69859.1015

مقدمه

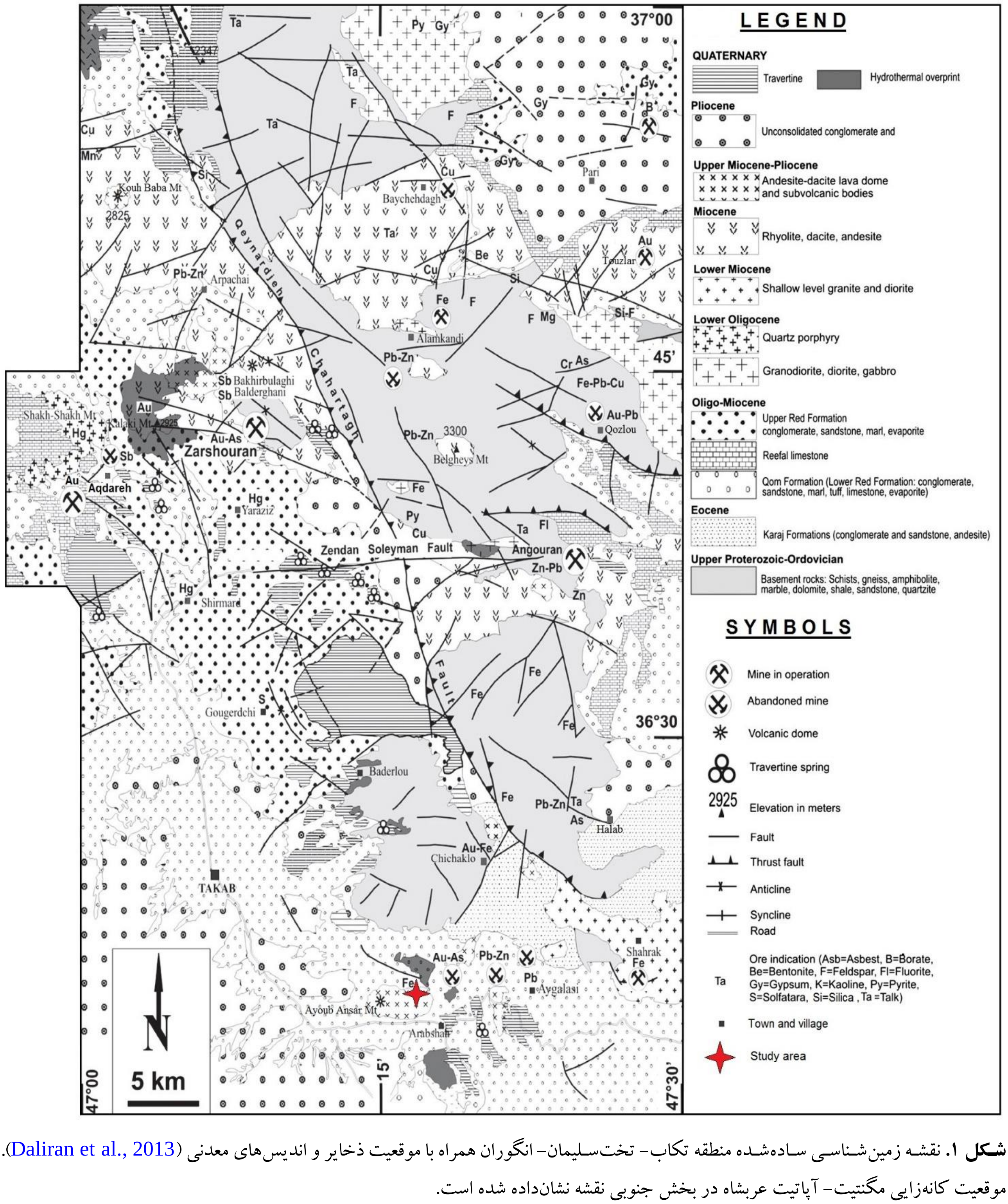
کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت معرف کانسارهای آهن نوع کایرونا هستند که از پروتروزوئیک تا ترشیری در مناطق مختلف جهان تشکیل شده‌اند و به طور معمول در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی کالک‌آلکالن هستند (Hitzman et al., 1992; Hitzman, 2000). آپاتیت از اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده این کانسارهاست که با مگنتیت و مقادیر مختلفی اکتینولیت همراه است. با وجود بررسی‌های فراوان بر روی این کانسارها، در مورد منشأ آنها اختلاف نظر وجود دارد. اغلب پژوهشگران از منشأ ماگمایی آنها و جایگزینی ماگمای غنی از مواد فرار و نهشته‌شدن مواد معدنی از سیال باقی‌مانده حمایت‌کرده و فرایند عدم امتزاج سیال‌ها را به عنوان منشأ این کانسارها در نظر گرفته‌اند (Hitzman et al., 1992; Hitzman, 2000). برخی دیگر از پژوهش‌ها، الگوی جانشینی متاسوماتیک توسط سیالات گرمابی غنی از آهن با شوری بالا و همچنین الگوی سیال ماگمایی را برای تشکیل توده‌های معدنی اکسید آهن- آپاتیت نوع کایرونا معرفی کرده‌اند (Hildebrand, 1986; Gleason et al., 2000; Boomeri, 2013; Nabatian et al., 2014). یکی از ویژگی‌های این گروه کانه‌زایی‌ها، تمرکزهای بالای عناصر کمیاب خاکی در آنهاست (Frietsch and Perdahl, 1995; Harlov et al., 2016).

کانه‌زایی‌های متعددی از اکسید آهن- آپاتیت در پهنه ایران مرکزی (مانند چغارت، چادرملو، میشدوان، چاه‌گز و لکه‌سیاه) و کمربند ماگمایی- متالوژنی طارم- هشتجین (مانند سرخه دیزج، مروارید، ذاکر و گلستان‌آباد) تشکیل‌شده است که توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Forster and Jafarzadeh, 1994; Jami et al., 2007; Torab and Lehman, 2008; Bonyadi et al., 2011; Nabatian, 2012; Mokhtari et al., 2013; Boomeri, 2013; Nabatian et al., 2014; Heidarian et al., 2017; Majidi et al., 2017).

بررسی‌های انجام‌شده نشان‌داده است که عناصر کمیاب خاکی به عنوان یکی از شاخص‌ترین عناصر همراه در کانه‌زایی‌های اکسید آهن- آپاتیت مناطق یادشده حضور دارند (Nabatian, 2012; Boomeri, 2013; Nabatian and Ghaderi, 2014; Mokhtari, 2015; Mokhtari et al., 2018).

کانه‌زایی آهن عربشاه تنها کانه‌زایی شناخته‌شده از نوع مگنتیت- آپاتیت در زیرپهنه تکاب- تخت‌سلیمان- انگوران است که در فاصله حدود ۱۵ کیلومتری جنوب‌خاور شهر تکاب و در حد فاصل روستاهای عربشاه، دورباش و سبیل در داخل گنبد آتشفشانی ایوب انصار رخنمون دارد (شکل ۱). از دیدگاه فلززایی، منطقه تکاب- تخت‌سلیمان- انگوران یکی از ایالت‌های فلززایی مهم در ایران محسوب می‌شود. کانسارهای طلا آرسنیک زرشوران (Daliran et al., 2003; Daliran et al., 2013; Mehrabi et al., 1999; Asadi et al., 1999)، طلا آنتیموان آق‌دره (Daliran 2008, Daliran et al., 2013)، طلای توزلار (Heidari et al., 2015) و طلا- آرسنیک عربشاه (Najafzadeh et al., 2017)، همراه با کانسار روی- سرب انگوران (Daliran et al., 2013; Gilg et al., 2006; Boni et al., 2007) در این منطقه قرار دارند (شکل ۱). از دیگر کانسارها و نشانه‌های معدنی موجود در این منطقه می‌توان به سرب- روی- نقره آی‌قلعه‌سی (Mohammadi Niaei et al., 2015)، روی- سرب- نقره حلب (Karami et al., 2021)، طلا- سرب قوزلو (Daliran, 2008; Daliran et al., 2013)، سرب- روی (طلا- آهن) چیچکلو (Daliran et al., 2013)، آنتیموان آق‌دره بالا، بلدرقانی و پخیربولاقی (Daliran et al., 2013)، جیوه شیرمرد، یارعزیز و کوه شاخ‌شاخ (Daliran et al., 2013)، کانسارهای آهن آتشفشانی رسوبی دگرگون‌شده گورگور (Mohammadi et al., 2014)، میانج (Pourmohamad et al., 2019) و حلب (Tofigi et al., 2019)، کانسارهای آهن اسکارنی شهرک (Maanijou and Khodaie, 2018) و علم‌کندی (Nouri et al., 2021) و کانسار مس بایچه‌باغ (Lotfi and Karimi, 2004) اشاره کرد (شکل ۱).

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده منطقه تکاب- تخت‌سلیمان- انگوران همراه با موقعیت ذخایر و اندیس‌های معدنی (Daliran et al., 2013). موقعیت کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه در بخش جنوبی نقشه نشان‌داده شده است.

Fig. 1. Symplified geological map of the Takab–Takht-e-Soleiman–Angouran region showing location of ore deosits and occurrences (Daliran et al., 2013). Location of the Arabshah magnetite- apatite mineralization indicated on the southern part of the map.

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

در سال‌های اخیر، بررسی‌های اکتشافی شامل بررسی‌های ژئوفیزیکی و حفر ترانشه‌های اکتشافی بر روی کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه انجام‌شده است؛ اما بررسی پژوهشی دقیقی بر روی آن انجام‌نشده است. این کانه‌زایی برای نخستین‌بار در این بخش از ایران معرفی شده است و بررسی شرایط تشکیل آن می‌تواند برای شناسایی کانه‌زایی‌های مشابه در این بخش از ایران مفید واقع شود. بر این اساس، در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، زمین‌شیمی، ویژگی‌های میانبارهای سیال بر روی کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه مورد بررسی قرارگرفته و نوع آن مشخص‌شده است. شناخت ویژگی‌های کانسار مگنتیت- آپاتیت عربشاه به عنوان اولین کانی‌سازی کشف‌شده نوع کایرونا در منطقه تکاب، می‌تواند برای اکتشاف این نوع کانه‌زایی‌ها در شمال‌باختر ایران مفید باشد.

روش مطالعه

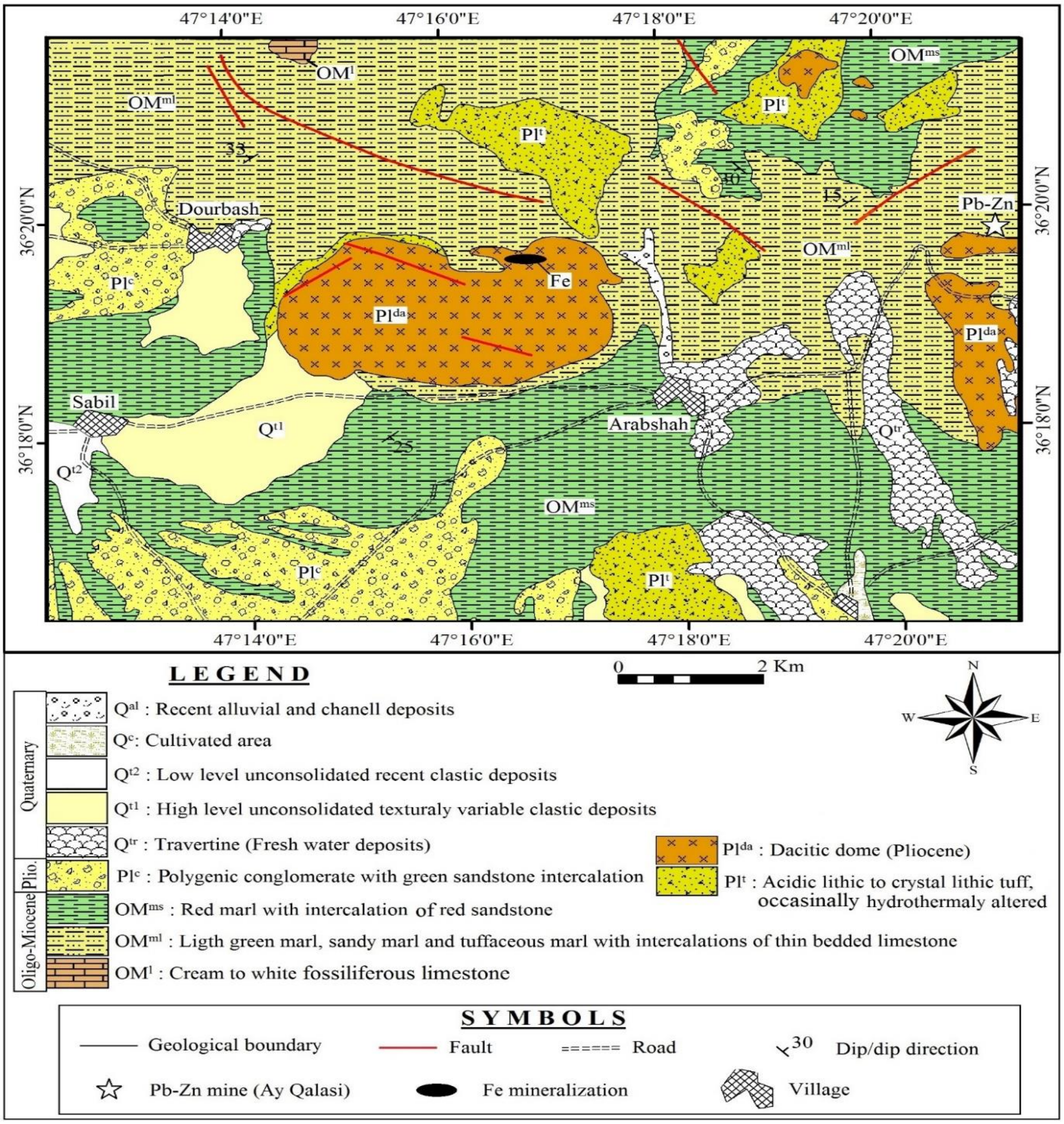
این پژوهش با انجام بازدیدهای صحرایی طی نوبت‌های متوالی و متناسب با کانه‌زایی، شروع و طی آن مشخصات و پدیده‌های زمین‌شناسی مرتبط با موضوع مورد پژوهش ثبت‌شد. همچنین از بخش‌های مختلف کانه‌زایی، برای بررسی‌های آزمایشگاهی نمونه‌برداری شد. از نمونه‌های برداشت‌شده، تعداد ۱۰ مقطع نازک و ۱۵ مقطع نازک- صیقلی تهیه و از آنها برای بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری استفاده شد. پس از بررسی‌های میکروسکوپی، تعداد ۲ نمونه برای بررسی میانبارهای سیال در بلورهای آپاتیت انتخاب‌شد. اندازه‌گیری‌های ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه میانبار سیال مدل Linkam THMS-600 متصل به میکروسکوپ ZEISS و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی TP94 و سردکننده LNP در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران در کرج انجام‌شده است. دامنه حرارتی دستگاه، ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد است. تنظیم دستگاه در مرحله گرمایش با دقت ۰/۶± درجه است که با نیترات سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و در مرحله سرمایش با دقت ۰/۲± درجه سانتی‌گراد و با ماده استاندارد ان هگزان با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد انجام‌شد. محاسبه شوری در میانبارهای حاوی فاز جامد هالیت با استفاده از دمای انحلال هالیت (Sterner et al., 1988; Lecumberri-Sanchez et al., 2012) و برنامه HOKIEFLINCS_H_2O-NaCl ارائه‌شده در محیط Excel (Steele-MacInnis et al., 2012) انجام و به‌صورت معادل وزنی نمک طعام (wt. % NaCl equiv.) محاسبه شد. همچنین، برای انجام بررسی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۶ نمونه از بخش‌های کانه‌دار انتخاب‌شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها توسط خُردکننده فولادی تا اندازه حدود ۵ مش (۴ میلی‌متر) خُرد شده و سپس با استفاده از آگات به مدت ۲ دقیقه تا اندازه حدود ۲۰۰ مش (۷۴ میکرون) پودر شدند. پس از آماده‌سازی، میزان ۲۰ گرم از پودر نمونه‌ها برای تعیین میزان عناصر کمیاب و کمیاب خاکی به روش ICP–MS به آزمایشگاه‌های مرکز پژوهش‌های کاربردی علوم زمین کرج، ارسال‌شد و مورد تجزیه قرارگرفت. برای تعیین میزان عناصر کمیاب خاکی، حدود ۰/۲ گرم از هر نمونه در لیتیم متابورات/ تترابورات ذوب و سپس در اسید نیتریک حل شد.

زمین‌شناسی

در تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین‌ساختی- رسوبی ایران، محدوده مورد بررسی در محل تلاقی پهنه‌های ساختمانی ایران مرکزی و سنندج- سیرجان قرارگرفته است و با واحدهای زمین‌شناسی ایران مرکزی (واحدهای الیگومیوسن معادل سازند قم) تناسب بیشتری نشان می‌دهد؛ اما وجود مجموعه‌های دگرگونی مشابه با پهنه سنندج- سیرجان در بخش شمال منطقه مورد بررسی (انواع سنگ‌های دگرگونی نظیر آمفیبولیت، شیست و مرمر) باعث شده است تا بسیاری از پژوهشگران، این منطقه را بخشی از پهنه سنندج- سیرجان قلمدادکنند. این منطقه بخش کوچکی از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تکاب (Fonoudi and Hariri, 2000) را در قسمت‌های میانی آن تشکیل می‌دهد.

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

قدیمی‌ترین سنگ‌های رخنمون‌یافته در منطقه مورد بررسی عبارت از توالی رسوبی شامل سنگ آهک (واحد OM^{l})، توالی مارن، مارن ماسه‌ای و توفی با میان‌لایه‌های سنگ آهک نازک‌لایه (واحد OM^{ml}) به همراه مارن‌های قرمز رنگ با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ قرمز (واحد OM^{ms}) مربوط به الیگومیوسن و معادل سازند قم است (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی کانه‌زایی آهن عربشاه برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ تکاب با کمی تغییرات از فنودی و حریری (Fonoudi and Hariri, 2000)

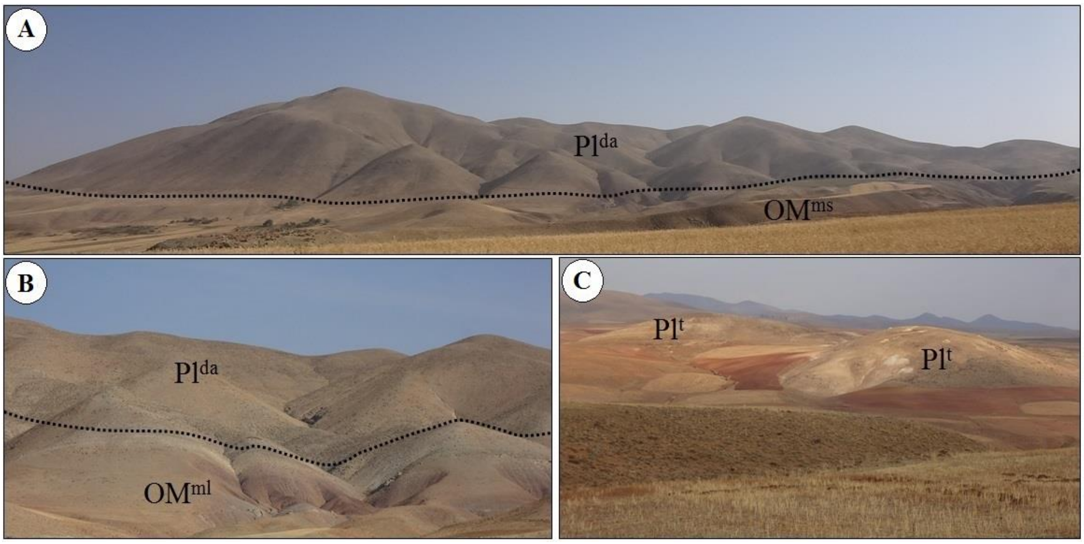
Fig. 2. Geological map of the Arabshah Fe mineralization based on Takab 1:100000 geologic map. Modified after Fonoudi and Hariri (2000)

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

بخش عمده منطقه توسط توالی رسوبی مزبور پوشیده شده و به شکل تپه‌ماهوری و ریخت‌شناسی ملایم رخنمون دارد. گنبدهای آتشفشانی اسیدی (مانند گنبد آتشفشانی ایوب انصار؛ Pl^{da})، واحدهای سنگی رسوبی الیگومیوسن را قطع کرده‌اند (شکل ۳-A). این گنبدها در ادامه تکوین فاز ماگمایی میوسن زیرین، به صورت توده‌های نیمه عمیق فلسیک در ۱۰ تا ۱۲ (میانگین ۱۱) میلیون سال قبل پدید آمده‌اند (Heidari et al., 2017). گنبد آتشفشانی ایوب انصار با راستای تقریبی خاوری- باختری در طول حدود ۴/۵ کیلومتر و پهنای ۲/۵ کیلومتر رخنمون دارد (شکل ۲ و شکل ۳-A). در محل تماس گنبد داسیتی با توالی رسوبی میزبان الیگومیوسن، حالت پخته‌شدن در سنگ‌های میزبان مشاهده می‌شود که با رنگ زرد آجری از دور مشخص می‌شود (شکل ۳-B). همچنین، در نتیجه حرکت گدازه در دامنه‌های گنبد بر روی واحد مارنی- ماسه‌سنگی الیگومیوسن، قطعه‌هایی از این سنگ‌ها در داخل گدازه‌ها به دام افتاده و منظره برشی را به وجود آورده‌اند.

گنبد آتشفشانی داسیتی ایوب انصار، میزبان کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت مورد بررسی است. بخش‌های مختلف گنبد آتشفشانی ایوب انصار در نمونه دستی و در مقیاس رخنمون دارای بافت‌های حفره‌ای و پورفیریتیک بوده و متشکل از درشت‌بلورهای کوارتز، فلدسپار و ورقه‌هایی از بیوتیت در زمینه دانه‌ریز هستند. ظاهر سنگ‌های مورد نظر، اغلب یکدست و بدون حفره است؛ اما در بعضی نقاط دارای سطوح حفره‌دار هستند. شکل حفره‌ها تقریباً کروی است؛ اما گاهی اوقات نیز به دلیل جریان گدازه در حال انجماد، شکل‌های کشیده به خود گرفته و به صورت بیضوی‌های نامنظم درآمده و منظره‌ای حفره‌حفره به سنگ داده است.

در بخش‌های شمال، شمال‌خاور و جنوب گنبد داسیتی ایوب انصار، رخنمون‌هایی از توالی توف سنگی تا توف بلورین سنگی (واحد Pl^{t}) مشاهده می‌شود که با درجه‌های متغیری متحمل دگرسانی آرژیلیکی شده و با رنگ سفید و زرد از دور خودنمایی می‌کنند (شکل ۳-C).



شکل ۳. تصویرهایی از واحدهای سنگی منطقه کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه. A: دورنمایی از گنبد آتشفشانی ایوب انصار (دید به سمت شمال‌خاور)، B: نمایی از دگرگونی مجاورتی توالی رسوبی الیگومیوسن با رنگ زرد در محل تماس با گنبد آتشفشانی ایوب انصار (دید به سمت شمال‌خاور) و C: نمایی از توالی توفی پلیوسن که متحمل دگرسانی آرژیلی شده است (دید به سمت شمال‌خاور).

Fig. 3. Field photos from the geological units in the Arabshah magnetite- apatite mineralization area. A: View from the Ayoub Ansar volcanic dome (looking to the northeast), B: A view from contact metamorphism of Oligo-Miocene sedimentary alternation with yellowish colour in contact with Ayoub Ansar volcanic dome (looking to the noetheast), and C: View from the Pliocene tuffs whith argillic alteration (looking to the northeast).

در بخش‌های با شدت دگرسانی بیشتر، توالی توفی مزبور به عنوان خاک صنعتی مورد بهره‌برداری قرارگرفته است. در بخش‌های باختری و جنوب‌باختری منطقه، کنگلومرای پلی‌ژنتیک حاوی میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ مربوط به پلیوسن (واحد Pl^c) بر روی توالی رسوبی الیگومیوسن قابل مشاهده هستند. رسوبات تراس‌های آبرفتی عهد حاضر نیز در بخش‌های باختری منطقه گسترش دارند. نتیجه بررسی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌های برداشت‌شده از گنبد آتشفشانی ایوب انصار بیانگر ترکیب داسیتی- ریوداسیتی با بافت‌های پورفیری، فلسوفیری و گلومروپورفیری در این سنگ‌هاست (شکل ۴-A). درشت‌بلورها شامل پلاژیوکلاز، آمفیبول و به مقدار کمتری کوارتز و فلدسپات آلکالن هستند که در زمینه‌ای نسبتاً دانه‌ریز متشکل از کوارتز، پلاژیوکلاز، کانی‌های کدر، فلدسپات آلکالن و آمفیبول‌های اکتینولیتی‌شده ریز قرار گرفته‌اند. گاهی اوقات بافت‌های بادامکی و حفره‌ای نیز مشاهده می‌شوند (شکل ۴-B). درشت‌بلور غالب این سنگ‌ها عبارت از بلورهای پلاژیوکلاز شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار است. برخی بلورهای پلاژیوکلاز دارای منطقه‌بندی هستند. بلورهای پلاژیوکلاز مربوط به دو نسل مختلف هستند: ۱- بلورهای درشت پلاژیوکلاز حاوی شواهد غیرتعادلی نظیر بافت غربالی (شکل ۴-C)، خوردگی حاشیه بلورها، منطقه‌بندی و دگرسانی که مربوط به نسل اول هستند؛ ۲- بلورهای پلاژیوکلاز کوچک‌تر که کاملاً سالم بوده و مربوط به نسل دوم هستند. کانی شاخص بعدی در گدازه‌های داسیتی- ریوداسیتی مورد بررسی، کوارتزهای گردشده گاه با خاموشی موجی، حاشیه‌های واکنشی و دندانه‌دار و گاه خلیجی‌شده است (شکل ۴-D). درشت‌بلور دیگر این سنگ‌ها، هورنبلند است که شکل‌های کشیده و باریک و گاه حاشیه‌های اوپاسیته داشته و متحمل دگرسانی اکتینولیتی و کلریتی شده‌اند. بلورهای فلدسپات آلکالن در اندازه‌های متفاوت درشت و کوچک تا حدود ۲ میلی‌متر، به صورت نیمه‌شکل‌دار تا کاملاً گردشده با حاشیه‌های واکنشی و به مقدار خیلی کم در زمینه سنگ پراکنده هستند (شکل ۴-E). بیوتیت شاخص‌ترین کانی فرعی این سنگ‌هاست که به صورت بلورهای ورقه‌ای کوچک حضور دارد. این کانی در برخی موارد، حاشیه‌های اوپاسیته‌شده نشان می‌دهد. دیگر کانی‌های فرعی سنگ شامل کانی‌های کدر، زیرکن، آپاتیت و اسفن هستند. در برخی نمونه‌ها، بیگانه‌سنگ‌هایی با بافت تمام دانه‌ای ریزبلور به شکل‌های گِردشده مشاهده می‌شود که متشکل از کانی‌های مافیک از جمله بیوتیت‌های با حاشیه اوپاسیته و آمفیبول بوده و متحمل فروپاشی شده و توسط کانی‌های کدر و کلریت جانشین‌شده است (شکل ۴-F). همچنین، پلاژیوکلازهای نسبتاً درشت در این بیگانه‌سنگ‌ها حضور دارند.

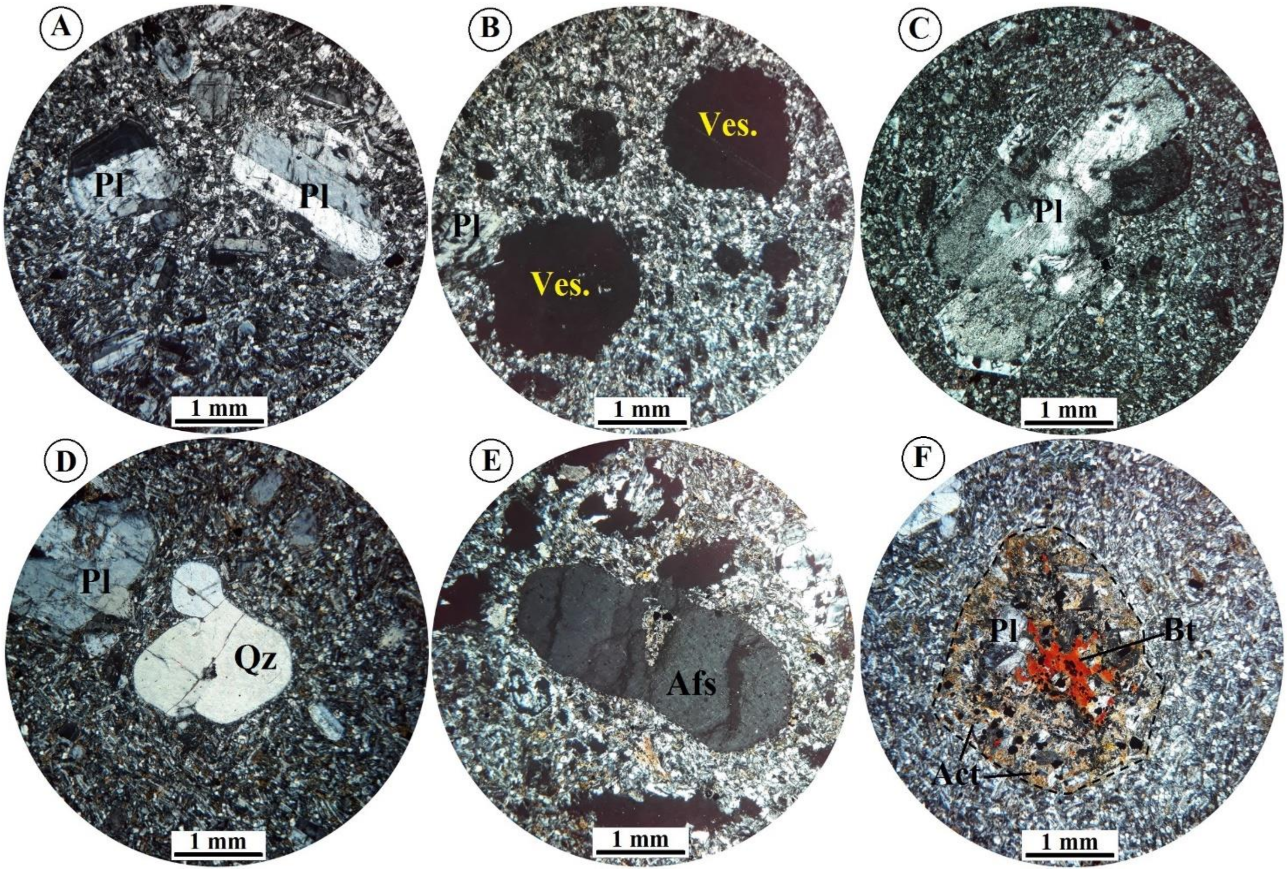
بر اساس شواهد زمین‌شیمیایی، گنبد آتشفشانی ایوب انصار، ترکیب داسیتی- ریوداسیتی داشته و دارای ماهیت کالک‌آلکالن پتاسیم متوسط است (Sabzi et al., 2018). این سنگ‌ها از لحاظ درجه اشباع از آلومینیم، متاآلومین با گرایش به سمت پرآلومین بوده و در زمره گرانیتوئیدهای نوع I طبقه‌بندی می‌شوند (Sabzi et al., 2018). بر اساس نمودارهای تمایز محیط زمین‌ساختی، گنبد داسیتی ایوب انصار در محیط‌های کمان قاره‌ای و هم‌زمان با برخورد تا پس از برخورد تشکیل شده است و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مشابه با آداکیت‌های غنی از سیلیس را نشان می‌دهد (Sabzi et al., 2018).

کانه‌زایی

کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه به صورت رگه- رگچه‌ای با راستای تقریبی خاوری- باختری و به ضخامت بیشینه یک متر و طول رخنمون حدود ۵۰ متر در داخل گنبد آتشفشانی ایوب انصار قابل مشاهده است (شکل ۵-A). این رگه، رخنمون ضعیفی در سطح زمین داشته و توسط عملیات حفر ترانشه توسط بخش خصوصی، رگه کانه‌دار آن آشکار شده است. بررسی‌های ژئوفیزیکی در این منطقه به شناسایی آنومالی‌های مغناطیسی قابل توجهی منجرشده است که باید عملیات حفاری عمقی به روش مغزه‌گیری بر روی آن انجام‌شود. ویژگی بارز رگه کانه‌دار رخنمون‌یافته، همراهی بلورهای شکل‌دار آپاتیت در ابعاد تا یک

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

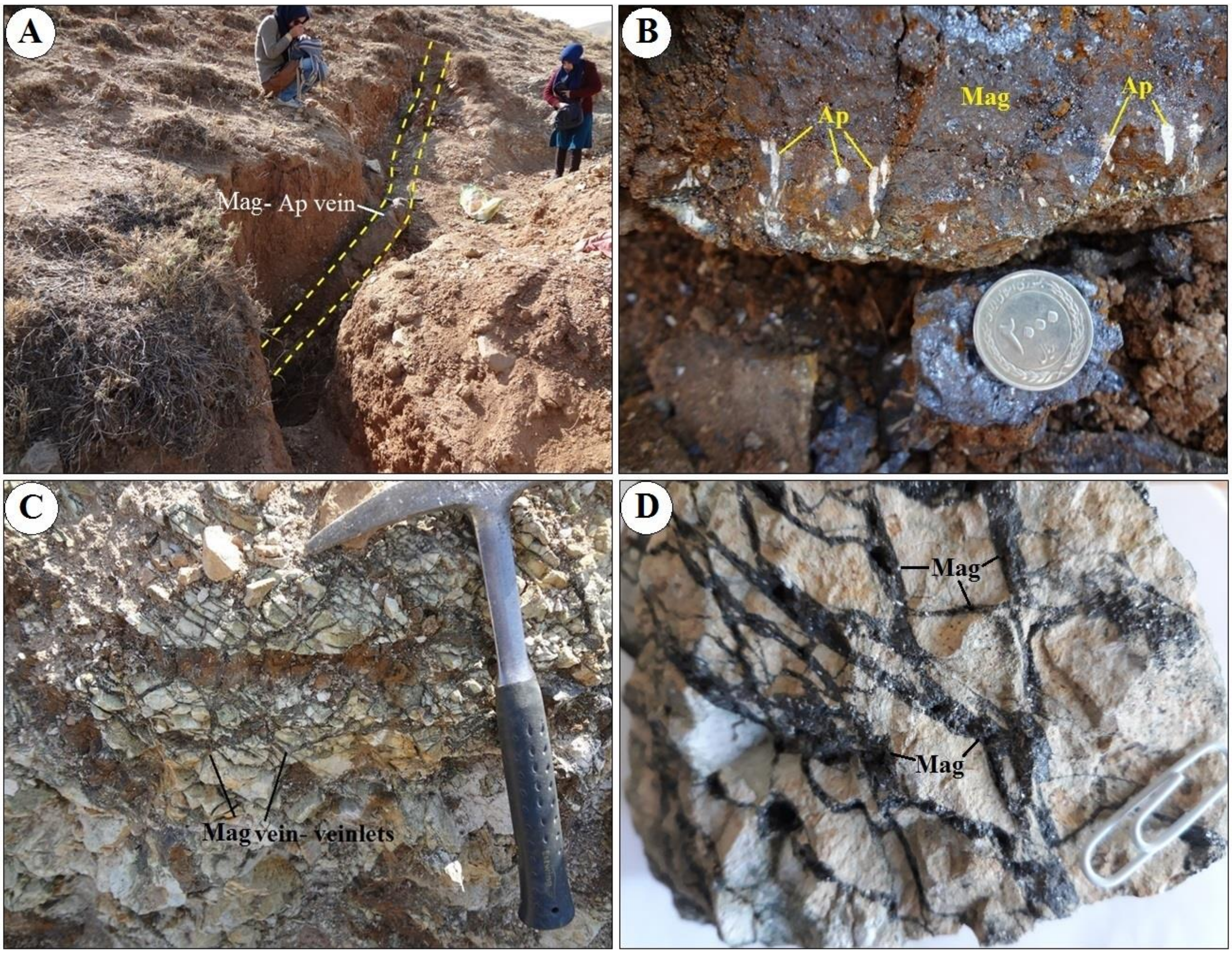
سانتی‌متر به ویژه در بخش‌های حاشیه‌ای رگه است (شکل ۵-B). در کمرپایین و کمربالای رگه اصــلی، رگه- رگچه‌های باریک مگنتیتی (ضــخامت کمتر از یک ســانتی‌متر) در داخل پهنه برشــی قابل مشاهده است (شکل ۵-C و D). ضخامت پهنه برشی در هر دو سـمت کمربالا و کمرپایین تا یک متر می‌رسـد. کانه اصـلی در این کانه‌زایی مگنتیت است که با مقادیر متغیری از بلورهای آپاتیت همراهی می‌شود.



شکل ۴. تصـویرهای میکروسـکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از گنبد داسـیتی ایوب انصـار در منطقه کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشـاه. A: بافت پورفیری در گنبد داسـیتی ایوب انصـار، B: بافت حفره‌ای در گنبد داسـیتی ایوب انصـار، C: درشـت‌بلور پلاژیوکلاز با بافت غربالی در گنبد داسـیتی ایوب انصار، D: درشت‌بلور گردشده کوارتز به همراه درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه دانه‌ریز در گنبد داسیتی ایوب انصار، E: درشت‌بلور گردشده آلکالی فلدســپار در زمینه دانه‌ریز حاوی بلورهای منشــوری هورنبلند و کوارتز در گنبد داســیتی ایوب انصــار و F: آنکلاو با بافت تمام دانه‌ای ریزبلور متشـکل از پلاژیوکلاز، اکتینولیت و بیوتیت در گنبد داسـیتی ایوب انصـار. علائم اختصـاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است (Afs: آلکالی فلدسپار، Bt: بیوتیت، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Ves: حفره).

Fig. 4. Photomicrographs (transmitted light, XPL) of Ayoub Ansar dacitic dome in the Arabshah magnetite- apatite mineralization area. A: Prophiritic texture in Ayoub Ansar dacitic dome, B: Vesicular texture in Ayoub Ansar dacitic dome, C: Plagioclase phenocryst with sieve texture in Ayoub Ansar dacitic dome, D: Rounded quartz phenocryst along with plagioclase phenocrysts within fine grained matrix in Ayoub Ansar dacitic dome, E: Rounded quartz phenocryst within fine grained matrix composed of prismatic hornbelvde and quartz in Ayoub Ansar dacitic dome, and F: Micro-granular enclave composed of plagioclase, actinolite and biotite in Ayoub Ansar dacitic dome. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Afs: alakli feldspar, Bt: biotite, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Ves: vesicul).

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015



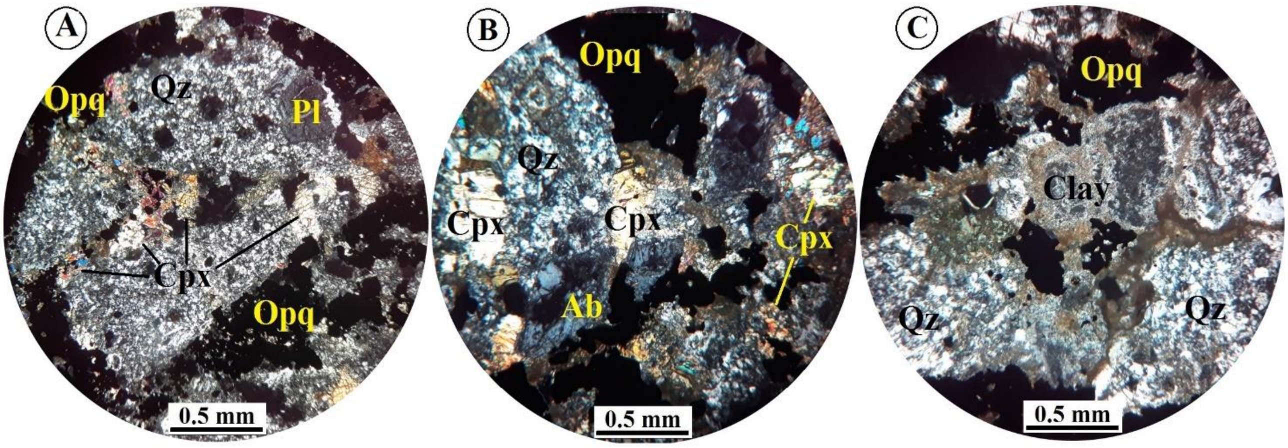
شکل ۵. تصویرهایی از کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه. A: نمایی از رگه مگنتیت- آپاتیت (دید به سمت باختر)، B: نمایی نزدیک از بلورهای درشت و شکل‌دار آپاتیت در حاشیه رگه مگنتیت- آپاتیت، C: رگه- رگچه‌های مگنتیت در کمربالای برشی‌شده رگه مگنتیت- آپاتیت و D: نمایی نزدیک‌تر از رگه- رگچه‌های مگنتیت کمربالای رگه مگنتیت- آپاتیت با ساختار برشی. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Ap: آپاتیت، Mag: مگنتیت).

Fig. 5. Photos from the Arabshah magnetite- apatite mineralization. A: View from the magnetite-apatite vein (looking to the west), B: Coarse-grained euhedral apatite crystals at the margin of magnetite atite vein, C: Magnetite vein-veinlets in the brecciated hanging wall of magnetite-apatite vein, and D: Close view from the magnetite vein-veinlets in the hanging wall of magnetite-apatite vein with brecciated texture. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ap: apatite, Mag: magnetite).

بر اساس بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی انجام‌شده، دگرسانی‌های گرمابی موجود در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه شامل دگرسانی‌های سدیک- کلسیک، سیلیسی و آرژیلیکی است. دگرسانی سدیک- کلسیک عبارت از تشکیل بلورهای پیروکسن و آلبیت در حاشیه رگه- رگچه‌های کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت است (شکل ۶-A). دگرسانی سیلیسی در منطقه مورد بررسی به صورت سیلیسی‌شدن سنگ میزبان حاشیه رگه مشاهده می‌شود (شکل ۶-A و B). دگرسانی آرژیلیکی به سمت بیرون رگه، به صورت هاله‌ای در اطراف دگرسانی‌های سدیک- کلسیک و سیلیسی و رگه- رگچه‌های کانه‌دار مشاهده می‌شود

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

(شکل ۶-C). در مقیاس صحرایی، این دگرسانی با رنگ سفید در حاشیه رگه مگنتیت- آپاتیت به سادگی قابل تشخیص است. علاوه بر این، دگرســانی آرژیلیکی گســتردهای در واحد توفی اطراف گنبد داسیتی ایوب انصار قابل مشاهده است که به عنوان خاک صنعتی در برخی نقاط بهره‌برداری شده است (شکل ۳-C).



شـکل ۶. تصـویرهای میکروسـکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از دگرسـانی‌های گرمابی در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشـاه. A و B: دگرسانی سیلیسی و سدیک- کلسیک حاشیه رگچه‌های مگنتیت- آپاتیت و C: دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلی حاشیه رگچه‌های مگنتیت- آپاتیت. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است (Ab: آلبیت، Clay: کانی رسی، Cpx: کلینوپیروکسن، Opq: کانی کدر، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز).

Fig. 6. Photomicrographs (transmitted light, XPL) from the hydrothermal alterations in the Arabshah magnetite-apatite mineralization. A: Sodic-calcic alteration around the magnetite-apatite veinlet, B: Silicic and sodic-calcic alterations around the magnetite-apatite veinlet, and C: Silicic and argillic alterations around the magnetite-apatite veinlet. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ab: albite, Clay: clay minerals, Cpx: clinopyroxene, Opq: opaque minerals, Pl: plagioclase, Qz: quartz).

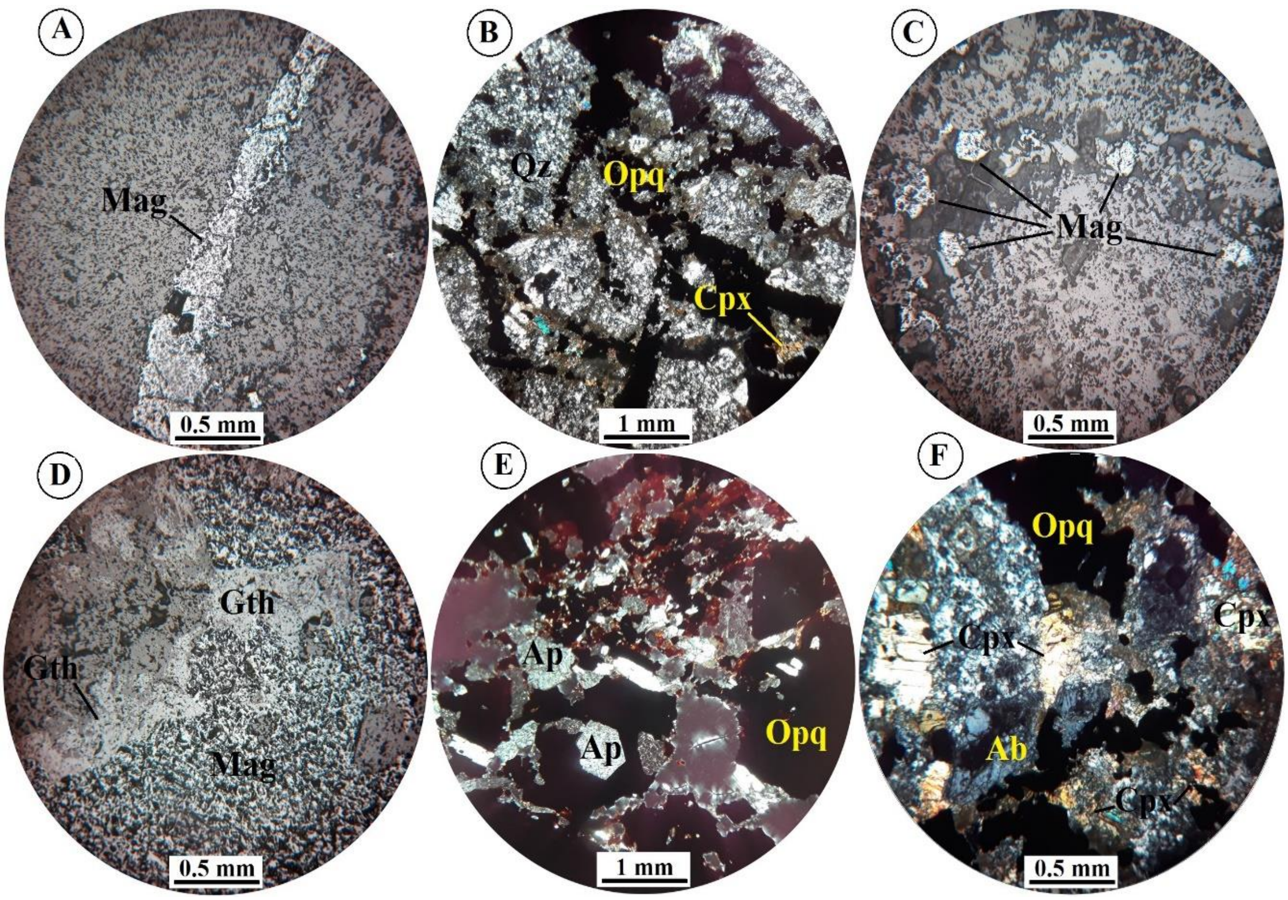
بحث و بررسی

کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

بر اســاس بررســی‌های کانه‌نگاری، مگنتیت تنها کانه موجود در کانه‌زایی عربشــاه اســت که با کانی‌های باطله آپاتیت، کلینوپیروکســن، آلبیت و کوارتز همراهی می‌شــود. گوتیت در نتیجه فرایندهای برون‌زاد تشکیل‌شـده اسـت. مگنتیت به صـورت بلورهای شکل‌دار تا بدون شکل با بافت‌های توده‌ای (شکل ۵-B)، رگه- رگچه‌ای (شـکل ۵-A، شـکل ۶-A و B و شـکل ۷-A)، بِرشی (شکل ۵-C و D و شکل ۷-B) و دانه‌پراکنده (شکل ۷-C) حضــور دارد. برخی بلورهای مگنتیت در نتیجه فرایند برون‌زاد از حاشیه بلور و شکستگی‌ها به گوتیت تبدیل‌شده است (شکل ۷-D). آپاتیت شــاخص‌ترین کانی همراه با کانه‌زایی مگنتیت در کانه‌زایی عربشاه است که به صورت بلورهای درشت شکل‌دار تا ریز نیمه‌شکل‌دار در متن مگنتیت و به ویژه در بخش حاشیه‌ای رگه مشاهده می‌شود (شکل ۵-B و شکل ۷-E). از نظر رنگی، بلورهای آپاتیت به رنگ سـفید قابل مشـاهده هسـتند. بلورهای شـکل‌دار آپاتیت با بافت دانه‌پراکنده در متن مگنتیت حضـور دارند. کلینوپیروکسن دیگر کانی شاخص همراه با کانه‌زایی اکسید آهن- آپاتیت در این منطقه اســت که به صــورت بلورهای شــکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار در حاشیه رگه- رگچه‌های مگنتیت مشاهده می‌شود

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

(شکل ۶-A و B و شکل ۷-F). کوارتز اغلب به صورت بلورهای ریز در سنگ‌های میزبان اطراف رگه- رگچه‌های مگنتیت- آپاتیت به صورت دگرسانی سیلیسی سنگ میزبان مشاهده می‌شود (شکل ۶-A و B).



شکل ۷. تصویرهای میکروسکوپی از بافت‌ها و کانی‌های موجود در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه. A: رگچه مگنتیت در متن سنگ میزبان (نور بازتابی PPL)، B: بافت برشی حاوی قطعه‌های سنگ میزبان سیلیسی‌شده و رگچه‌های مگنتیت (نور عبوری XPL)، C: مگنتیت به صورت دانه پراکنده در مسیر شکستگی سنگ میزبان (نور بازتابی PPL)، D: دگرسانی برون‌زاد مگنتیت به گوتیت در مسیر شکستگی (نور بازتابی PPL)، E: بلورهای درشت و شکل‌دار آپاتیت در داخل مگنتیت (نور عبوری XPL) و F: بلورهای کلینوپیروکسن و آلبیت تشکیل‌شده در حاشیه رگچه‌های مگنتیت (نور عبوری XPL). علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس‌شده است (Ab: آلبیت، Ap: آپاتیت، Cpx: کلینوپیروکسن، Gth: گوتیت، Mag: مگنتیت، Opq: کانی کدر، Qz: کوارتز).

Fig. 7. Photomicrographs from textures and minerals of the Arabshah magnetite-apatite mineralization. A: Magnetite veinlet within host rock (PPL reflected light), B: Brecciated texture containing silicified host rock clasts and magnetite veinlets (XPL transmited light), C: Disseminated magnetite crystals along the fracture of host rock (PPL reflected light), D: Supergene alteration of magnetite to goethite along the fracture (PPL reflected light), E: Coarse-grained euhedral apatite crystals within the magnetite (XPL transmited light), and F: Clinopyroxene and albite around the magnetite veinlets (XPL transmited light). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Ab: Albite, Ap: apatite, Cpx: clinopyroxene, Gth: goethite, Mag: magnetite, Opq: opaque mineral, Qz: quartz).

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

نتیجه بررسی‌های صحرایی و میکروسکوپی بیانگر آن است که ساخت و بافت‌های موجود در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه شامل رگه- رگچه‌ای، توده‌ای، برشی، دانه‌پراکنده و جانشینی است. بافت‌های رگه- رگچه‌ای و برشی، شاخص‌ترین بافت‌ها در منطقه هستند. بافت برشی محصول فشار هیدرواستاتیک سیالات گرمابی کانه‌ساز است که به شکستگی و برشی‌شدن سنگ میزبان داسیتی منجرشده و کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت در داخل این شکستگی‌ها نهشته‌شده است. بافت دانه‌پراکنده حاصل حضور آپاتیت در متن مگنتیت است. همچنین، بلورهای مجزای مگنتیت در مسیر شکستگی‌ها به صورت دانه‌پراکنده تشکیل‌شده است. گوتیت حاصل از فرایندهای برون‌زاد در مسیر شکستگی‌های مگنتیت بوده و بافت جانشینی را به وجود آورده است.

مراحل کانه‌زایی و توالی همبرزادی

شواهد متعددی برای ترسیم توالی همبرزادی در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه مدنظر قرارگرفته است که مهم‌ترین آنها عبارتند از: ۱- حضور بلورهای شکل‌دار آپاتیت در متن مگنتیت و همچنین تمرکز بلورهای آپاتیت در حاشیه رگه‌های مگنتیت بیانگر تبلور زودتر تا هم‌زمان آپاتیت با مگنتیت است؛ ۲- حضور کلینوپیروکسن در حاشیه رگه- رگچه‌های مگنتیت بیانگر تبلور این کانی قبل از مگنتیت است؛ ۳- کوارتز موجود در سنگ میزبان سیلیسی‌شده حاشیه رگه- رگچه‌های مگنتیت- آپاتیت وکلینوپیروکسن‌ها نشان‌دهنده تشکیل کوارتز قبل از کانی‌های مزبور است و ۴- کانی‌های رسی اغلب در نتیجه عملکرد سیالات دما پایین و دگرسانی فلدسپارها در حاشیه رگه- رگچه‌های کانه‌زایی و همچنین در سنگ‌های توفی اطراف گنبد داسیتی ایوب انصار تشکیل شده‌اند. لازم به ذکر است که بخشی از کانی‌های رسی نیز در نتیجه فرایندهای برون‌زاد تشکیل‌شده است. ۵- در مرحله دگرسانی برون‌زاد، مگنتیت توسط گوتیت جانشین‌شده است. بر این اساس، توالی همبرزادی کانی‌ها و کانه‌های موجود در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه در شکل ۸ نشان‌داده شده است.

زمین‌شیمی عناصر کمیاب خاکی در پهنه‌های کانه‌دار

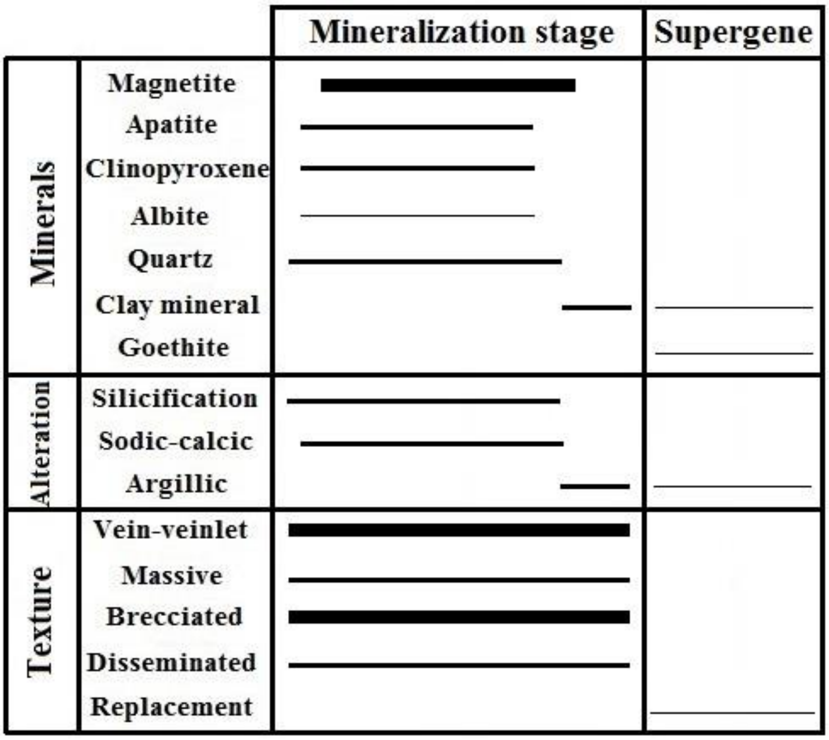
در این بخش، الگوی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه مورد بررسی قرارگرفته است. این بررسی‌ها بر اساس نتایج آنالیز شیمیایی ۶ نمونه، شامل دو نمونه کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا با مقادیر ناچیز آپاتیت، دو نمونه از کانسنگ مگنتیت- آپاتیت و دو نمونه از بلورهای آپاتیت تفکیک‌شده از کانسنگ مگنتیت- آپاتیت است که به روش ICP–MS در آزمایشگاه مرکز پژوهش‌های کاربردی علوم تجزیه شده‌اند (جدول ۱). همچنین از میانگین نتایج آنالیزهای مربوط به گنبد داسیتی ایوب انصار (Sabzi et al., 2018) برای مقایسه استفاده شده است. الگوی عناصر کمیاب خاکی برای نمونه‌های پهنه‌های کانه‌دار مختلف نسبت به کندریت (McDonough and Sun, 1995) بهنجار شده‌اند (شکل ۹).

با توجه به شکل ۹، همه نمونه‌ها یک الگوی پرشیب غنی از عناصر کمیاب خاکی سبک با نسبت بالای LREE/HREE را به همراه آنومالی منفی Eu نشان می‌دهند. تفاوت این نمونه‌ها در مقدار غنی‌شدگی از عناصر کمیاب خاکی است که نمونه‌های آپاتیت، تمرکز بالاتر و نمونه‌های کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا با مقادیر جزئی آپاتیت، تمرکز پایین این عناصر را نشان می‌دهند (شکل ۹). الگوی غنی از LREE با نسبت بالای LREE/HREE همراه با آنومالی منفی Eu از ویژگی‌های کانسارهای آهن نوع کایروناست (Frietsch and Perdahle, 1995). الگوی عناصر کمیاب خاکی میانگین گنبد داسیتی ایوب انصار برای مقایسه با الگوی عناصر کمیاب بخش‌های مختلف کانه‌زایی این کانسار در شکل ۹ نشان‌داده شده است. گنبد داسیتی ایوب انصار دارای یک الگوی غنی از LREE با نسبت متوسط LREE/HREE و بدون آنومالی منفی Eu است. نبود آنومالی منفی Eu در داسیت را می‌توان در ارتباط با عدم تفریق پلاژیوکلاز و تمرکز این کانی در سنگ در نظر گرفت؛ در حالی‌که آنومالی منفی شاخص Eu در است.

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

نمونه‌های کانه‌زایی می‌تواند در ارتباط با تفریق پلاژیوکلاز از ماگمای مولد سیالات گرمابی سازنده کانه‌زایی باشد. به طور کلی می‌توان گفت که گنبد داسیتی ایوب انصار و مجموعه نمونه‌های کانه‌زایی الگوی تقریباً مشابهی را هم به نمایش می‌گذارند (شکل ۹) که می‌تواند بیانگر ارتباط زایشی کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه با گنبد داسیتی ایوب انصار باشد.

چنان‌که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تمرکز مجموع عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های آنالیزشده از بخش‌های مختلف کانه‌زایی در کانه‌زایی عربشاه بالا بوده و در نمونه‌های آپاتیت بیش از یک درصد است. مجموع عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های مگنتیت- آپاتیت و کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا با مقادیر جزئی آپاتیت نیز به ترتیب ۰/۱۶ تا ۰/۱۸ درصد و ۲۸۱ تا ۴۱۲ گرم در تن است (جدول ۱).



شکل ۸. توالی همبرزادی کانه‌ها و کانی‌های باطله در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه

Fig. 8. Paragenetic sequence of ore and gangue minerals in the Arabshah magnetite-apatite mineralization

میان‌بارهای سیال

سنگ‌نگاری

میان‌بارهای سیال موجود در نمونه‌های کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه به سه شکل اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب (Roedder, 1984) مشاهده می‌شوند. میان‌بارهای موجود به شکل‌های متنوع حضور دارند؛ اما شکل‌های منفی بلور (Shepherd et al., 1985)، در میان‌بارهای سیال بررسی شده، متداول‌تر است. اندازه میان‌بارهای سیال قابل بررسی در نمونه‌های مطالعه‌شده بین ۵ تا ۱۷ میکرون متغیر است.

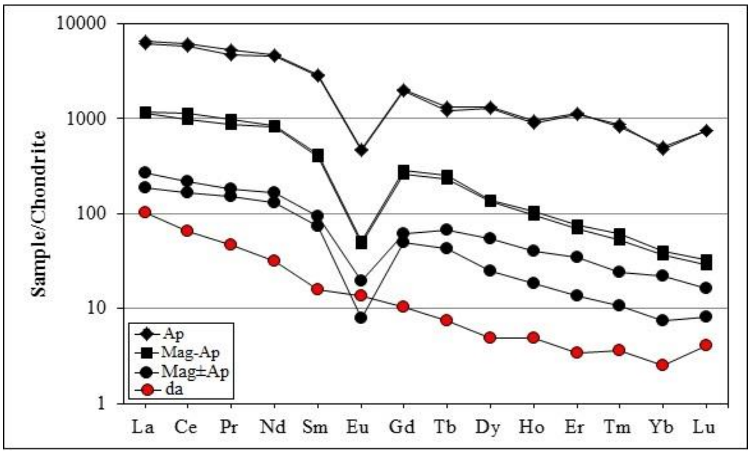
DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب و کمیاب خاکی برای نمونه‌های کانه‌دار کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه. داده‌ها بر حسب گرم در تن (ppm) هستند.

Table 1. Geochemical data of trace and rare earth elements for ore samples of the Arabshah magnetite- apatite mineralization. Data in ppm.

S.N. S. Type	Ar.1 Mag-Ap	Ar.2 Mag-Ap	Ar.3 Mag±Ap	Ar.4 Mag±Ap	Ar.5 Ap	Ar.6 Ap	Average da
Ba	4	4.5	10	7	<1	<1	868.1
Co	24.3	23.7	26.2	23.7	3.7	3.5	3.6
Cr	14	14.1	16	15	17	13	47.9
Cu	18	19.4	14	24	42	16	3.4
Fe	62.2 (%)	61.3 (%)	67.3 (%)	64.6 (%)	5426	6512	14931.7
Hf	0.5	0.6	0.1	0.4	1.7	1.9	1.7
Nb	7.2	6.8	4.0	3.6	7.4	8.7	11.7
Ni	32	31	39	41	7	6	7.1
P	7862	8264	684	847	>3 (%)	>3 (%)	554.6
Pb	8	9	4	5	14	18	114
Sc	1.4	1.3	1.1	1.2	1.5	1.6	8.3
Sr	54.2	65.4	5.4	6.7	156.2	150.4	442.4
Ta	0.5	0.4	0.1	0.2	0.7	0.6	0.7
Th	30.5	28.4	6	8.4	36.7	24.3	4.7
Ti	4628	4432	8864	8407	12	26	2192.4
U	1.2	1.8	0.3	0.7	13.4	12.1	1.2
V	1284	1178	2814	2346	46	92	30.5
Y	114.7	134.6	27.7	68.2	1423.2	1457.1	7.1
Zn	132	124	172	146	18	14	551.3
Zr	11.2	12.4	3.1	8.7	18	21	66.1
La	267.7	281.4	44.1	64	1468	1542	24.4
Ce	606.1	710.2	102.8	132	3594	3779	39.5
Pr	80	91.2	14.1	16.7	441.2	487.6	4.3
Nd	372.4	391.2	59	76.4	2118.2	2138.4	14.6
Sm	59.4	62.8	10.9	13.7	423.6	434.2	2.3
Eu	2.7	2.9	0.4	1.1	26.4	27.2	0.8
Gd	51.9	57.2	9.8	12.4	396.2	402.1	2.1
Tb	8.4	9.1	1.5	2.4	44.2	48.4	0.3
Dy	33.3	34.2	6.2	13.2	316.4	328.2	1.2
Ho	5.3	5.8	1	2.2	48.4	52.1	0.3
Er	11.2	12.1	2.1	5.6	176.4	182	0.6
Tm	1.3	1.5	0.3	0.6	21.2	20.4	0.1
Yb	5.9	6.4	1.2	3.6	76.4	82.7	0.4
Lu	0.7	0.8	0.2	0.4	18.2	18.6	0.1
REEt	1621.1	1801.4	281.3	412.5	10592.0	11000.0	97.9

Mag-Ap: Apatite-bearing magnetite ore, Mag±Ap: Magnetite ore without or with minore apatite, Ap: Apatite crystals with minor magnetite accumulation, da: Ayoub Ansar dacitic dome.



شکل ۹. الگوی عناصر کمیاب خاکی بهنجارشده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای نمونه‌های کانه‌دار کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه

Fig. 9. Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) REE patterns for mineralized samples of the Arabshah magnetite-apatite mineralization.

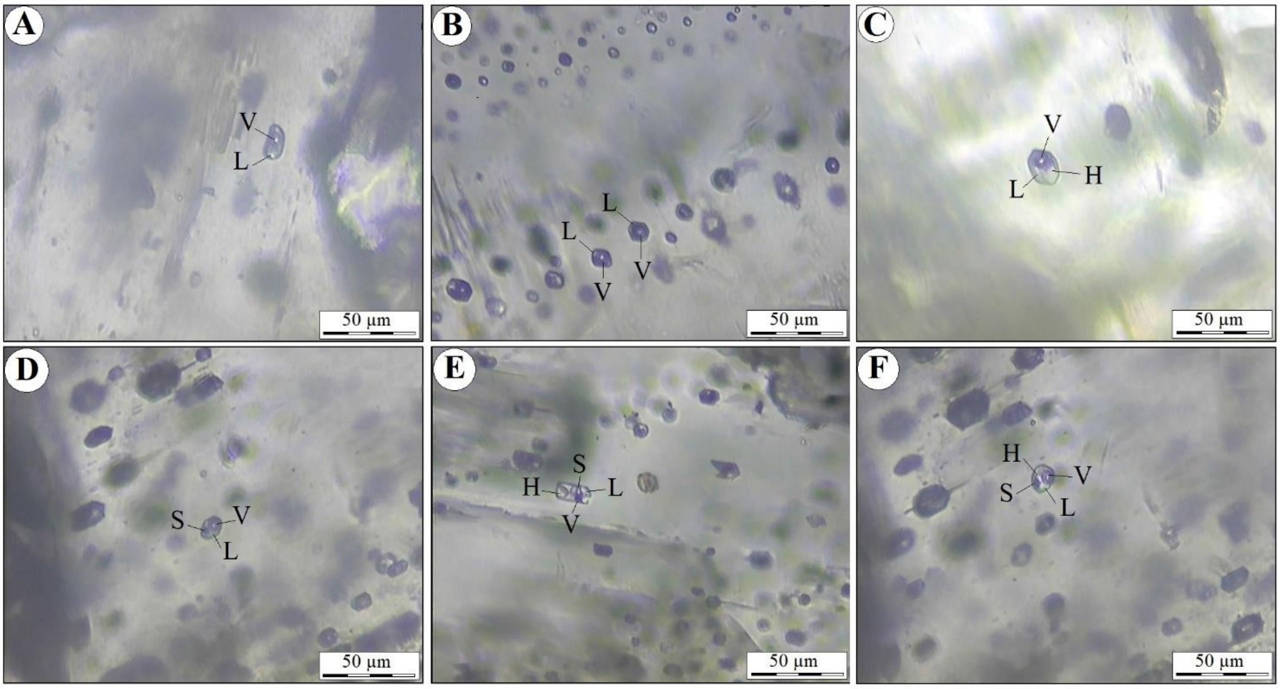
بر اساس ویژگی‌های سنگ‌نگاری در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و با توجه به معیارهای ارائه‌شده توسط رودر (Roedder, 1984)، میانبارهای سیال اولیه موجود در کانی آپاتیت در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه شامل انواع زیر هستند:

۱) میانبارهای آبگین دو فازی: این میانبارهای سیال در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) دارای فازهای مایع و بخار و بدون فاز جامد (کانی‌های نوزاد) بوده و بر اساس نسبت فاز مایع به بخار به دو زیرگروه غنی از مایع (LV) و غنی از بخار (VL) قابل تفکیک هستند. میانبارهای نوع LV فراوان‌ترین میانبارهای دو فازی در کانه‌زایی عربشاه هستند. این میانبارها غنی از فاز مایع بوده و در بیشتر آنها، فاز مایع بیش از ۹۰ درصد و فاز بخار کمتر از ۱۰ درصد حجم کل سیال را تشکیل داده‌اند (شکل ۱۰-A). میانبارهای نوع LV به صورت مجزا و یا مجموعه سیال در کانی آپاتیت حضور داشته و در مرحله گرمایش به فاز مایع همگن می‌شوند. حجم فاز بخار در میانبارهای نوع VL معمولاً بیش از ۸۵ درصد است (شکل ۱۰-B). این میانبارها در مرحله گرمایش به فاز بخار همگن می‌شوند. میانبارهای نوع VL از فراوانی کمتری در کانه‌زایی عربشاه برخوردار هستند. در مرحله سرمایش (تا دمای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)، در هیچ‌یک از میانبارهای سیال دو فازی، کلاتریت تشکیل نشد که این امر بیانگر نبود فاز کربنیک در سیال است.

۲) میانبارهای سیال سه‌فازی: این میانبارهای سیال در دمای اتاق دارای فازهای مایع، بخار و یک فاز جامد بوده و بر اساس نوع فاز جامد به دو زیرگروه دارای هالیت (LVH) و دارای کانی کدر (LVS) قابل تفکیک هستند (شکل ۱۰-C و D). حجم فاز بخار و بلور هالیت در میانبارهای نوع LVH در مجموع کمتر از ۵۰ درصد حجم کل سیال را شامل می‌شود. اندازه کانی‌های کدر در میانبارهای نوع LVS بسیار ریز (معمولاً کمتر از ۰/۵ میکرون) بوده و تشخیص نوع کانی کدر مقدور نیست.

۳) میانبارهای سیال چندفازی (LVHS): این میانبارهای سیال در دمای اتاق دارای فازهای مایع، بخار، هالیت و یک فاز جامد (کانی‌های کدر ± سیلویت) هستند. حجم فاز بخار و فازهای جامد در میانبارهای نوع LVHS در مجموع حدود ۴۰ درصد حجم کل سیال را شامل می‌شود (شکل ۱۰-E و F).

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015



شکل ۱۰. تصویرهای میکروسکوپی (نور پلاریزه صفحه‌ای، PPL) انواع میان‌بارهای سیال اولیه در کانی آپاتیت در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه. A: میان‌بار سیال دوفازی نوع LV، B: میان‌بارهای سیال دوفازی نوع VL و LV، C: میان‌بار سیال سه‌فازی نوع LVH، D: میان‌بار سیال سه‌فازی نوع LVS، E و F: میان‌بارهای سیال چندفازی نوع LVHS. (H: هالیت، L: مایع، S: کانی کدر، V: بخار)

Fig. 10. Microphotographs (plane poloarized light; PPL) from the primary fluid inclusions within the apatite from the Arabshah magnetite- apatite mineralization, A: LV two-phase fluid inclusion, B: LV and VL two-phase fluid inclusions, C: LVH three-phase fluid inclusion, D: LVS three-phase fluid inclusion, E and F: LVHS polyphase fluid inclusions (H: halaite, L: liquid, S: opaque mineral, V: vapor)

بررسی‌های ریزدماسنجی

داده‌های ریزدماسنجی بررسی‌شده بر روی میان‌بارهای سیال اولیه (۵۰ عدد) موجود در کانی آپاتیت در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه در جدول ۲ خلاصه و در شکل ۱۱ نشان‌داده شده است. در بررسی‌های ریزدماسنجی، دماهای اولین نقطه ذوب یخ (T_e) و ذوب آخرین قطعه یخ ($T_{m\text{-}ice}$) در هیچ‌یک از میان‌بارهای سیال قابل اندازه‌گیری نبود. از این رو، مقدار شوری آنها تنها برای میان‌بارهای سیال حاوی فاز هالیت (میان‌بارهای نوع LVH و LVHS) محاسبه‌شده است. تمامی میان‌بارهای سیال نوع LV با درجه‌های پُرشدگی نسبتاً ثابتی به فاز مایع همگن می‌شوند که نشان می‌دهد سیال اولیه موجود در میان‌بارها، یک سیال همگن (Buchanan et al., 1981) بوده است.

دمای همگن‌شدن نهایی ($T_{h(total)}$) میان‌بارهای سیال دوفازی نوع LV بین ۲۵۳ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۳۷۱ درجه سانتی‌گراد) و میان‌بارهای سیال نوع VL بین ۳۶۳ تا ۴۹۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۴۳۳ درجه سانتی‌گراد) متغیر است (جدول ۲ و شکل ۱۱-A). در میان‌بارهای سیال سه‌فازی نوع LVH، هالیت در دماهای بین ۲۵۵ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۳۴۵ درجه سانتی‌گراد) ذوب می‌شود (جدول ۲ و شکل ۱۱-B). این دماها بیانگر شوری بین ۳۵ تا ۵۹/۸ درصد وزنی معادل نمک طعام است (جدول ۲ و شکل ۱۱-C). محدوده دمای همگن‌شدن نهایی در این میان‌بارهای سیال بین ۲۷۸ تا ۵۰۸ درجه سانتی‌گراد (میانگین

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

۳۹۵ درجه سانتی‌گراد) تغییر می‌کند (جدول ۲ و شکل ۱۱-A). دمای همگن‌شدن نهایی در میانبارهای سیال سه‌فازی نوع LVS بین ۲۴۰ تا ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۴۸۷ درجه سانتی‌گراد) متغیر است (جدول ۲ و شکل ۱۱-A). دمای ذوب هالیت در میانبارهای سیال چندفازی نوع LVHS، بین ۲۶۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد) تغییر می‌کند (جدول ۲ و شکل ۱۱-B). بر این اساس، میزان شوری در این میانبارهای سیال بین ۳۶ تا ۵۹ درصد وزنی معادل نمک طعام است (جدول ۲ و شکل ۱۱-C). دمای همگن‌شدن نهایی در این میانبارهای سیال بین ۲۳۰ تا ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد) تغییر می‌کند (جدول ۲ و شکل ۱۱-A). داده‌های به دست آمده از دمای همگن‌شدن و شوری میانبارهای سیال حاوی فاز هالیت در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه همخوانی زیادی با داده‌های میانبارهای سیال کانسارهای آهن مروارید (۲۱۲ تا ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۸/۸ تا ۱۶/۵ درصد وزنی نمک طعام)، ذاکر (۲۰۰ تا ۴۱۶ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۳/۷ تا ۲۲/۱ درصد وزنی نمک طعام)، علی‌آباد (۲۱۰ تا ۴۹۹ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۱ تا ۱۸ درصد وزنی نمک طعام)، خانلیق (۲۵۳ تا ۵۲۱ درجه سانتی‌گراد و شوری ۵۷/۷ تا ۶۱/۷ درصد وزنی نمک طعام)، چغارت (۳۷۰ تا ۳۸۵ درجه سانتی‌گراد و شوری ۲۰ تا ۳۹ درصد وزنی نمک طعام) و چادرملو (۳۳۳ تا ۴۵۲ درجه سانتی‌گراد و شوری ۴۰ تا ۵۶ درصد وزنی نمک طعام) نشان می‌دهد (Asadi and Khorshidian, 2013; Nabatian et al., 2014; Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2015; Asadi et al., 2019).

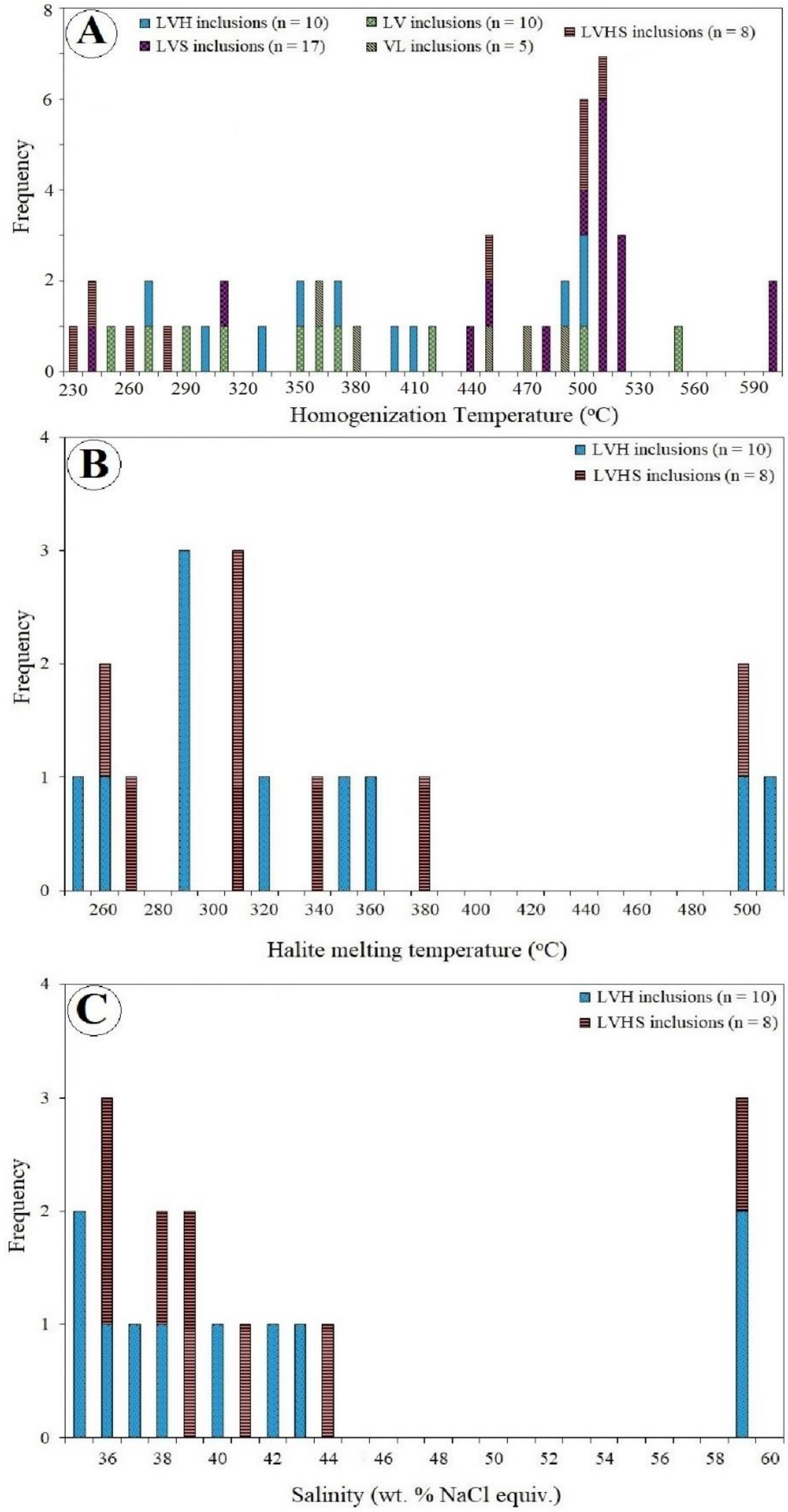
روند تحول سیال کانه‌ساز در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه بر اساس نمودار تغییرات دمای همگن‌شدن در برابر شوری در میانبارهای سیال نوع LVH و LVHS در شکل ۱۲ نشان‌داده شده است. بر اساس این شکل، تحول سیال کانه‌ساز در این کانه‌زایی با فرایندهای اختلاط هم‌دما و رقیق‌شدگی سیالات (Wilkinson, 2001) مطابقت دارد که در این بین، فرایند دوم (رقیق‌شدگی سیال) نقش مهم‌تری داشته است. به طور کلی می‌توان گفت که سیال کانه‌ساز در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه اغلب دارای منشأ ماگمایی بوده که در ادامه در اثر اختلاط‌با سیالات جوی رقیق شده است.

جدول ۲. خلاصه داده‌های ریزدماسنجی میانبارهای سیال اولیه موجود در کانی آپاتیت در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه

Table 2. Summury of microthermometric data of primary fluid inclusions within the apatite crystals in the Arabshah magnetite-apatite mineralization

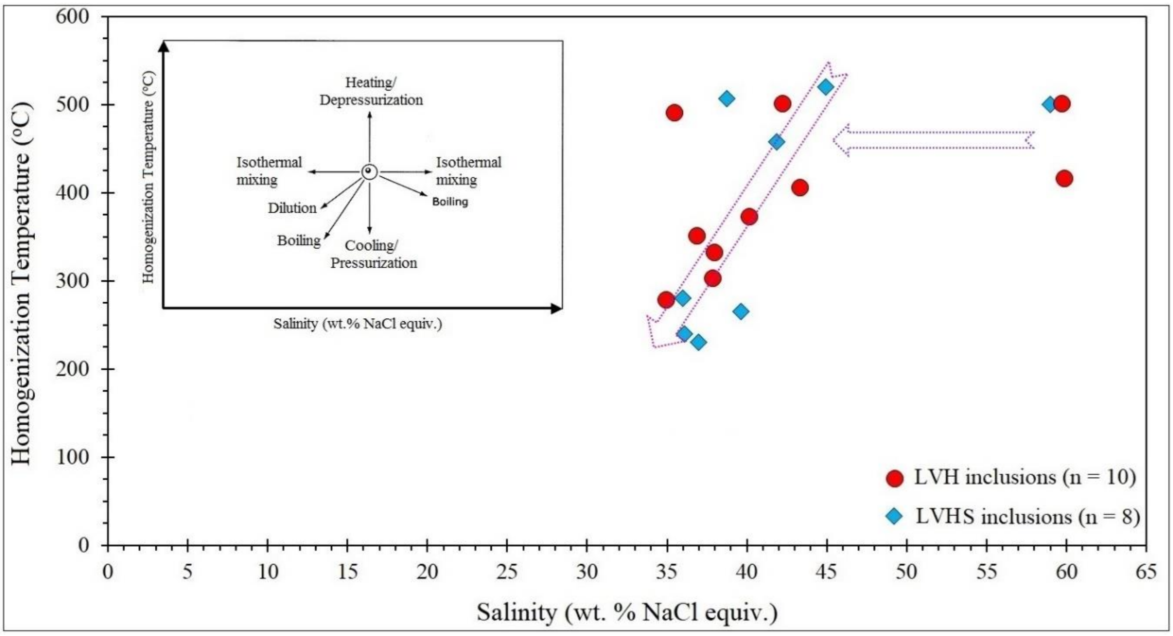
Incl. type	Size (µm)	T_e (°C)	$T_{m\text{-}ice}$ (°C)	$T_{m\text{-}h}$ (°C)	T_h (°C)	Salinity (wt. % NaCl equiv.)	Density (g/cm^3)
LV (n=10)	7–15	-	-	-	253–550 (371)[1]	-	-
VL (n=5)	8–10	-	-	-	363–490 (433)	-	-
LVH (n=10)	8–12	-	-	255–500 (345)	278–508 (395)	35–59.8 (42.9)	0.87–1.2
LVS (n=17)	5–12	-	-	-	240–520 (487)	-	-
LVHS (n=8)	8–17	-	-	260–500 (340)	230–520 (375)	36–59 (42.4)	0.89–1.2

[1] داده‌ها محدوده اندازه‌گیری‌شده را نشان داده و اعداد داخل پرانتز، عدد میانگین است. T_e: اولین نقطه ذوب یخ، $T_{m\text{-}ice}$: ذوب آخرین قطعه یخ، $T_{m\text{-}h}$: دمای ذوب هالیت، T_h: دمای همگن‌شدن



شکل ۱۱. نمودار فراوانی برای میان‌بارهای سیال اولیه در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه. A: دمای همگن‌شدن، B: دمای ذوب هالیت و C: شوری

Fig. 11. Frequency histograms for primary fluid inclusions in the Arabshah magnetite-apatite mineralization. A: homogenization temperature, B: halite melting temperature, and C: salinity



شکل ۱۲. نمودار دوتایی دمای همگن‌شدن در مقابل شوری برای داده‌های میان‌بارهای سیال نوع LVH و LVHS در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه. روندهای موجود نشان‌دهنده فرایندهای اختلاط هم‌دما و رقیق‌شدگی حین تحول سیال کانه‌ساز هستند. نمودار شماتیک داخلی بیانگر روندهای معمول میان‌بارهای سیال طی فرایندهای مختلف تحول سیال (Wilkinson, 2001) است.

Fig. 12. T_h vs. salinity diagram for LVH and LVHS fluid inclusion data in the Arabshah magnetite-apatite mineralization. The trends of fluids indicative for isothermal mixing and dilution of fluids during the evolution of mineralized fluids. Internal schematic diagram indicative for common trends of fluid inclusions during the different processes of fluid evolution (Wilkinson, 2001).

نوع کانه‌زایی

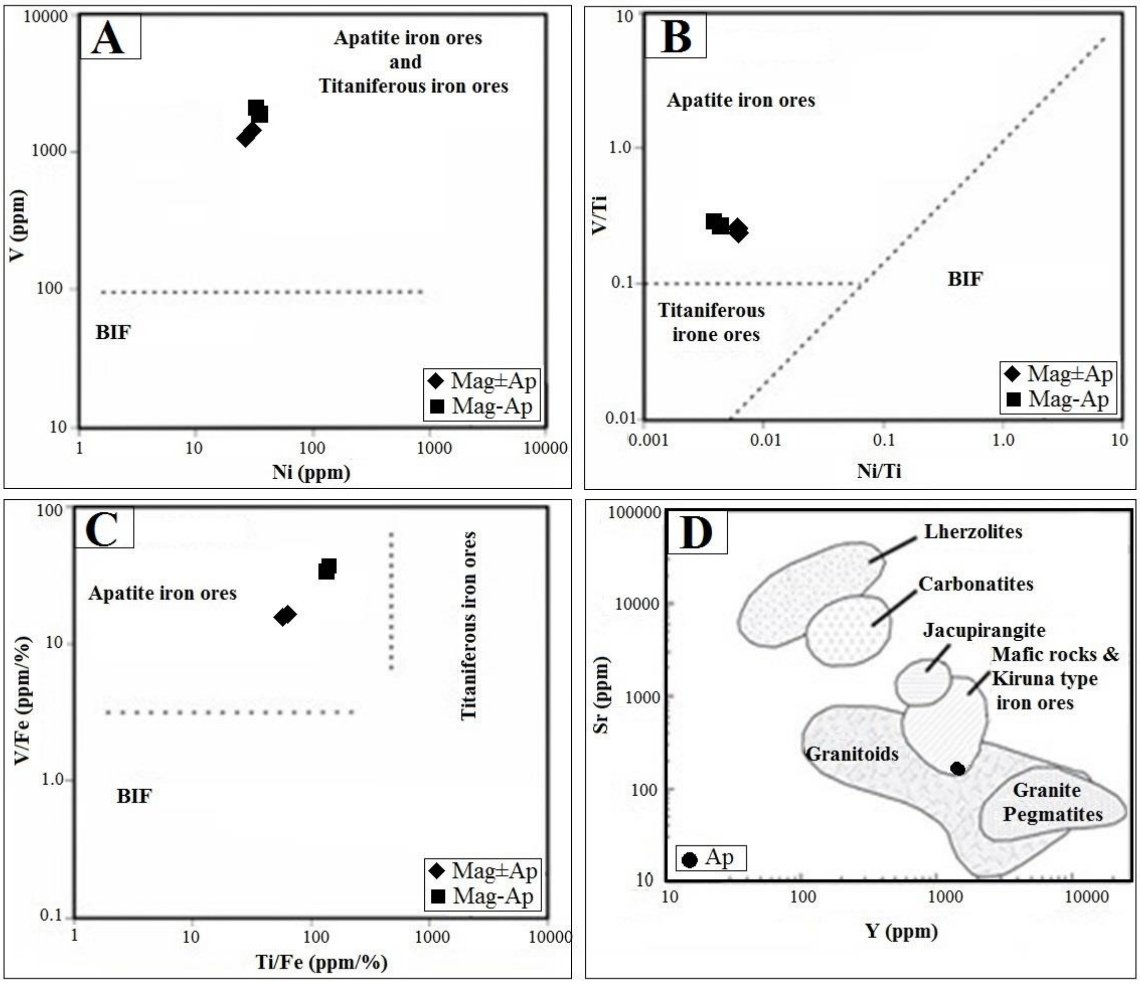
لوبرگ و هورندال (Loberg and Horndal, 1983) با استفاده از مقادیر Fe، Ni، V و Ti به رده‌بندی انواع کانسارهای آهن پرداخته‌اند. با استفاده از تغییرات V در مقابل Ni می‌توان کانسارهای آهن آپاتیتی و تیتانیم‌دار را از کانسارهای آهن رسوبی جدا کرد. همچنین، از تغییرات نسبت V/Ti به Ni/Ti می‌توان کانسارهای آهن- آپاتیت را از کانسار آهن تیتان‌دار و کانسار آهن نواری شناسایی کرد. در نمونه‌های آنالیزشده از منطقه مورد بررسی، دو نمونه از کانسنگ مگنتیتی بدون آپاتیت یا حاوی مقادیر جزئی آپاتیت در همراهی با دو نمونه کانسنگ مگنتیت- آپاتیت مورد آنالیز قرارگرفته است (جدول ۱). بر اساس مقادیر Ni، V، Ti و Co موجود در این نمونه‌ها، کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه در محدوده کانسارهای آهن آپاتیت‌دار قرار می‌گیرد (شکل ۱۳-A، B و C). در نمودار Y در مقابل Sr (Belousova et al., 2002) نیز دو نمونه برداشت‌شده از آپاتیت‌های موجود در کانه‌زایی عربشاه در قلمرو سنگ‌های مافیک و کانسارهای آهن نوع کایرونا واقع می‌شوند (شکل ۱۳-D).

مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه با دیگر کانسارهای آهن- آپاتیت در منطقه زنجان (Nabatian and Ghaderi, 2014; Mokhtari et al., 2018; Kordian et al., 2020) و ایران مرکزی (Mokhtari et al., 2013; Mokhtari, 2015) بیانگر شباهت کامل آنها با یکدیگر است (شکل ۱۴-A، B، C، D و E). از طرف دیگر، مقایسه

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی کانه‌زایی اکسید آهن- آپاتیت عربشاه با الگوی کانسارهای آهن نوع کایرونا در دیگر نقاط جهان نظیر کانسارهای کایرونا (Frietsch and Perdahle, 1995)، شباهت بین آنها را نشان می‌دهد (شکل ۱۴-F).

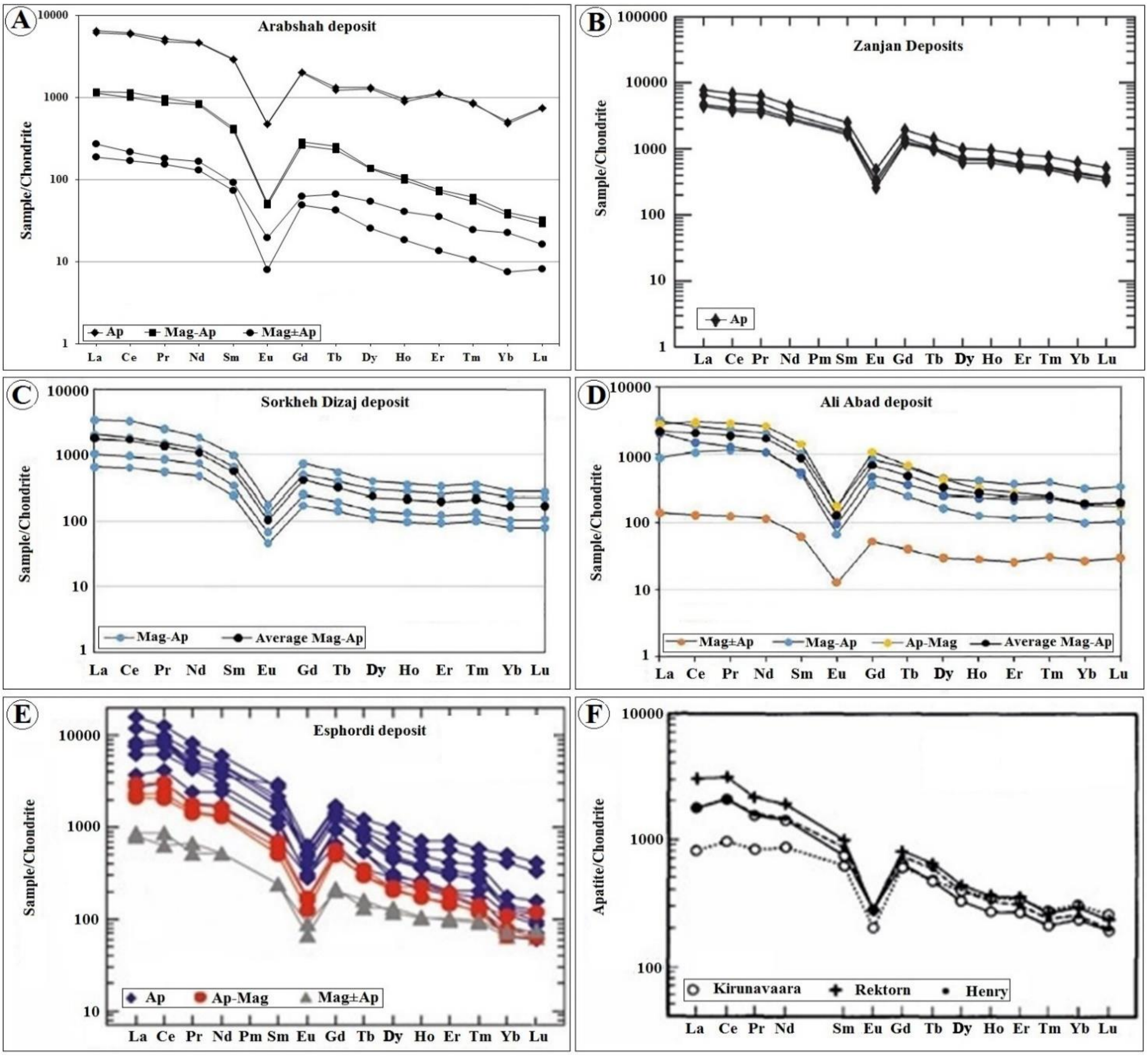
بر اساس تقسیم‌بندی دیل (Dill, 2010) و با در نظرگرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه، می‌توان این کانه‌زایی را در زمره کانسارهای آهن ماگمایی و زیرمجموعه کانسارهای آهن حاوی آپاتیت- عناصر کمیاب خاکی در نظر گرفت.



شکل ۱۳. موقعیت نمونه‌های کانسنگ مگنتیت- آپاتیت و کانسنگ مگنتیت بدون آپاتیت یا حاوی مقادیر جزئی آپاتیت در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه بر روی نمودارهای لوبرگ و هورندال (Loberg and Horndahl, 1983). A: نمودار V در مقابل Ni، B: نمودار Ni/Ti در مقابل V/Ti، C: نمودار Ti/Fe در مقابل V/Fe و D: موقعیت نمونه‌های آپاتیت کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه بر روی نمودار Y در مقابل Sr (Belousova et al., 2002)

Fig. 13. Location of magnetite-apatite and magnetite withiout or with negligible apatite samples from the Arabshah magnetite- apatite mineralization on Loberg and Hrondahl (1983) diagrams. A: V vs. Ni diagram, B: Ni/Ti vs. V/Ti diagram, C: Ti/Fe vs. V/Fe diagram, and D: Location of apatite samples of the Arabshah magnetite- apatite mineralization on Y vs. Sr diagram (Belousova et al., 2002)

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015



شکل ۱۴. A: الگوی عناصر کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشاه، B: الگوی عناصر کمیاب خاکی در آپاتیت‌های کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت منطقه زنجان (Nabatian et al., 2012)، C: الگوی عناصر کمیاب خاکی در کانسار اکسید آهن- آپاتیت سرخه دیزج (Mokhtari et al., 2018)، D: الگوی عناصر کمیاب خاکی در کانسار اکسید آهن- آپاتیت علی‌آباد (Mokhtari et al., 2018)، E: الگوی عناصر کمیاب خاکی در کانسار اکسید آهن- آپاتیت اسفوردی در ایران مرکزی (Mokhtari et al., 2013) و F: الگوی عناصر کمیاب خاکی در کانسارهای آهن نوع کایرونا (Frietsch and Perdahle, 1995)

Fig. 14. A: Chondrite-normalized REE patterns of the Arabshah magnetite-apatite mineralization samples, B: Chondrite-normalized REE patterns in apatites of the iron oxide-apatite deposits from the Zanjan district (Nabatian et al., 2012), C: Chondrite-normalized REE patterns in samples of the Sorkheh Dizaj iron oxide-apatite deposit (Mokhtari et al., 2018), D: Chondrite-normalized REE patterns in samples of the Ali Abad iron oxide-apatite deposit (Mokhtari et al., 2018), E: Chondrite-normalized REE patterns in samples of the Esphordi iron oxide-apatite deposit, Central Iran (Mokhtari et al., 2013), and F: Chondrite-normalized REE patterns in samples of the Kiruna-type iron deposits (Frietsch and Perdahle, 1995)

نتیجه‌گیری

کانـه‌زایی مگنتیـت- آپـاتیـت عربشـــاه در زیرپهنـه تکـاب- تخت‌سـلیمان- انگوران به صـورت رگه- رگچه‌ای در داخل گنبد داسیتی ایوب انصار به سن پلیوسن تشکیل‌شده است. کانه اصلی در این کانه‌زایی، مگنتیت اســت که با مقادیر متغیری از بلورهای آپاتیت و کلینوپیروکســن و آلبیت همراهی می‌شــود. ویژگی بارز کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشــاه، تمرکز بالای عناصــر کمیاب خاکی بوده و محتوای مجموع عناصــر کمیاب خاکی در بلورهای آپاتیت بیش از یک درصـد اسـت. بلورهای آپاتیت موجود در این کانه‌زایی یک الگوی پرشیب غنی از عناصر کمیاب خاکی سبک با نسبت بالای LREE/HREE را به همراه آنومالی منفی Eu نشان می‌دهند که از ویژگی‌های کانســارهای آهن نوع کایروناســت. مقایسه الگوی توزیع عناصر کمیاب خاکی در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشــاه با دیگر کانســارهای آهن- آپاتیت منطقه زنجان، کانسـارهای آهن- فسـفات ایران مرکزی و کانسـارهای آهن نوع کایرونا در نقاط مختلف جهان، شباهت بین آنها را نشان می‌دهد.

داده‌های به دسـت آمده از بررسـی میان‌بارهای سـیال نشـان می‌دهد که کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشـــاه از ســیالات ماگمایی منشأگرفته است. بر اساس این داده‌ها، تحول سیال کانه‌ساز در این کانه‌زایی با فرایندهای اختلاط هم‌دما و رقیق‌شــدگی ســیالات مطابقت داشــته و نشــان‌دهنده اختلاط ســیالات ماگمایی و جوی اســت. داده‌های به دســت آمده از دمای همگن‌شــدن و شــوری میان‌بارهای سـیال در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشـاه همخوانی زیادی با داده‌های میان‌بارهای سـیال کانسـارهای آهن نوع کایرونا در دیگر نقاط ایران نشان می‌دهد.

به طور کلی، شـواهدی از قبیل مجموعه کانی‌شـناسـی، سـاخت و بافت ماده معدنی، دگرســانی ســنگ دیواره و زمین‌شــیمی در کانه‌زایی مگنتیت- آپاتیت عربشـاه نشـان می‌دهد که این کانه‌زایی را می‌توان در دسته کانسارهای آهن نوع کایرونا تقسیم‌بندی کرد. با توجه به سن سنگ میزبان، کانه‌زایی عربشاه جوان‌ترین کانه‌زایی آهن شناخته‌شده از نوع کایرونا در ایران است. بر این اساس، تعمیم شـواهد به دسـت آمده از این بررسـی‌ها به مناطق مشـابه در زیرپهنه تکاب- تخت سلیمان- انگوران و گنبدهای داسیتی جوان می‌تواند کاربرد فراوانی در شناسایی و اکتشاف کانسارهای نوع کایرونا در این دوره زمانی داشته باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

نویســندگان از حمایت‌های مالی دانشــگاه زنجان برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند. همچنین نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از ســردبیر و داوران نشــریه زمین‌شــناســی اقتصــادی به خاطر راهنمایی‌های علمی که به غنای بیشـتر این مقاله منجر شـده اسـت، تشکر نمایند.

DOI: 10.22067/ECONG.2021.69859.1015

References

Asadi, S. and Khorshidian, F., 2013. Fluid inclusion microtrmometry and geochemistry of the Chadormalou deposit, evidences from IOCG mineralization in Bafq mining district. 17th Symposium of Geological Society of Iran, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)

Asadi, S., Manouchehry Nya, M. and Hassannezhad, A.A., 2019. Origin of Choghart iron ore deposit, Central Iran: Application of the geochemistry of fluid inclusion. Journal of Advanced Applied Geology, 17(3): 59–71. (in Persian with English abstract) http://dx.doi.org/10.22055/aag.2019.28137.1918

Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A. and Hale, M., 1999. Invisible gold at Zarshuran, Iran. Economic Geology, 94(8): 1367–1374. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.8.1367

Belousova, E., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y. and Fisher, N.L., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology 143(5): 602–622. https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7

Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G., Schneider, J., Allen, C.R. and Moore, F., 2007. Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran. Mineralium Deposita, 42: 799–820. https://doi.org/10.1007/s00126-007-0144-4

Bonyadi, Z., Davidson, G.J., Mehrabi, B., Meffre, S. and Ghazban, F., 2011. Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se–Chahun iron oxide–apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights from paragenesis and geochemistry. Chemical Geology, 281(3–4): 253–269. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.12.013

Boomeri, M., 2013. Rare earth minerals in Esfordi magnetite-apatite deposit, Bafq district. Scientific Quarterly Journal, Geosciences 22(85): 71–82. (in Persian with English abstract) http://dx.doi.org/10.22071/gsj.2012.54023

Buchanan, L.J., De Vivo, B., Kramer, A.K. and Lima, A., 1981. Fluid inclusion study of the Fiumarella barite deposit (Catanzaro, south Italy). Mineralium Deposita, 16: 215–226. https://doi.org/10.1007/BF00202736

Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran, hydrothermal alteration and mineralization. Mineralium Deposita, 43: 383–404. https://doi.org/10.1007/s00126-007-0167-x

Daliran, F., Hofstra, A.H., Walther, J. and Stüben, D., 2003. Aghdarreh and Zarshuran SRHDG deposits, Takab region, NW Iran. GSA Annual Meeting, Abstract with Programs, Session 63–8. Retrieved November 2 –5, 2003 from https://www.agw.kit.edu/english/1427_1506.php

Daliran, F., Pride, K., Walther, W., Berner, Z.A. and Bakker, R.J., 2013. The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide–zinc carbonate mineralization. Ore Geology Reviews, 53: 373–402. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.02.002

Dill, H.G., 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. Earth-Science Reviews 100(1–4): 1–420. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.011

Fonoudi, M. and Hariri, A., 2000. Geological map of Takab, scale 1:100000. Geological Survey of Iran.

Forster, H. and Jafarzadeh, A., 1994. The Bafq mining district in central Iran: a high mineralized infra-Cambrian volcanic field. Economic Geology, 89(8): 1697–1721. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.89.8.1697

Frietsch, R. and Perdahl, J.A., 1995. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types. Ore Geology Reviews 9(6): 489–510. https://doi.org/10.1016/0169-1368(94)00015-G

Gilg, H.A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C.R., Banks, D. and Moore, F., 2006. Marble-hosted sulphide ores in the Angouran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. Mineralium Deposita 41: 1–16. https://doi.org/10.1007/s00126-005-0035-5

Gleason, J.D., Marikos, M.A., Barton, M.D. and Johnson, D.A., 2000. Neodymium isotope study of rare earth element sources and mobility in hydrothermal Fe oxide (Fe-P-REE) system. Geochemical et Cosmochemica Acta 64(6): 1059–1068. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00325-7

Harlov, D., Meighan, C.G., Kerr, I.D. and Samson,

I.M., 2016. Mineralogy, chemistry, and fluid-aided evolution of the Pea Ridge Fe-oxide-REE deposit, southeast Missouri, USA. Economic Geology, 11(8): 1963. http://dx.doi.org/10.2113/econgeo.111.8.1963

Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L. and Gasquet, D., 2015. Geology, timing, and genesis of the high sulfidation Au (–Cu) deposit of Touzlar, NW Iran. Ore Geology Reviews, 65: 460–486. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.013

Heidari, S.M., Ghaderi, M., Kouhestani, H., 2017. Sediment-hosted epithermal gold mineralization at Arabshah, SE Takab, NW Iran. Scientific Quarterly Journal, Geosciences 27(105): 233–244. (in Persian with English abstract) http://doi.org/10.22071/gsj.2017.53971

Heidarian, H., Alirezaie, S. and Lenta, D.R., 2017. Chadormalu Kiruna-type magnetite-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data. Ore Geology Reviews, 83: 43–62. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.031

Hildebrand, R.S., 1986. Kiruna- type deposit: their origin and relationship to inter mediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, Northwest Canada. Economic Geology 81(3): 640–659. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.3.640

Hitzman, M.W., 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when and why? In: Porter, T.M., (Editor), Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, 1. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp. 9–25. Retrieved December 3-5, 2000 from https://books.google.com/books/about/Hydrothermal_Iron_Oxide_Copper_gold_Rela.html?id=NXPxAAAAMAAJ

Hitzman, M.W., Oreskes, N. and Einaudi, M.T., 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Protrozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits. Precambrian Research, 58(1): 241–287. https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90121-4

Jami, M., Dunlop, A.C. and Cohen, D.R., 2007. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite- magnetite deposit, Central Iran. Economy Geology, 102(6): 1111–1128. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.6.1111

Karami, F., Kouhestani, H., Mokhtari, M.A.A. and Azimzadeh, A.M., 2021. The Halab deposit, SW Zanjan: Volcanogenic massive sulfide Zn–Pb (Ag) mineralization, Takab–Takht-e-Soleyman–Angouran metallogenic district. Journal of Economic Geology, 13(1): 165–192. (in Persian with English abstract) https://dx.doi.org/10.22067/econg.v13i1.76448

Kordian, Sh., Mokhtari, M.A.A., Kouhestani, H. and Veiseh, S., 2020. Geology, mineralogy, structure and texture, geochemistry and genesis of the Golestan Abad iron oxide- apatite deposit (East of Zanjan). Journal of Economic Geology, 12(3): 299–325. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v12i3.79628

Lecumberri-Sanchez, P., Steele-Macinnis, M. and Bodnar, R.J., 2012. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. Geochimica et Cosmochimica Acta, 92: 14–22. https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.044

Loberg, B.E.H. and Horndal, A.K., 1983. Ferride geochemistry of Swidish Precambrian iron ores. Mineralium Deposita, 18(3): 487–504. Retrieved June 15, 2021 from https://link.springer.com/article/10.1007/BF00204493

Lotfi, M. and Karimi, M., 2004. Mineralogy and ore genesis of Bayche Bagh five elements (Ag-Ni-Co-As-Bi) vein deposit (NW Zanjan, Iran). Scientific Quarterly Journal, Geosciences, 12(53): 40–55. (in Persian with English abstract)

Maanijou, M. and Khodaie, L., 2018. Mineralogy and electron microprobe studies of magnetite in the Sarab-3 iron Ore deposit, southwest of the Shahrak mining region (East Takab). Journal of Economic Geology, 10(1): 267–293. (in Persian with extended English abstract) https://doi.org/10.22067/econg.v10i1.56522

Majidi, S.A., Lotfi, M., Emami, M.H. and Nezafati, N., 2017- The genesis of iron oxide-apatite (IOA) deposits: evidence from the geochemistry of apatite in Bafq-Saghand district, Central Iran. Scientific Quarterly Journal, Geosciences, 27(105): 233–244. (in Persian with English abstract) http://dx.doi.org/10.22071/gsj.2017.54185

Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H., 2015. Mineralization and fluid inclusion studies of the Khanlogh iron oxide- apatite deposit, noetheast Iran. Advanced Applied Geology, 17(3): 59-71. (in Persian with English abstract) http://dx.doi.org/10.22055/aag.2015.11825

McDonough, W.F. and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth. Chemical Geology, 120(3-4): 223–253. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4

Mehrabi, B., Yardley, B.W.D. and Cam, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. Mineralium Deposita, 34: 673–696. https://doi.org/10.1007/s001260050227

Mohammadi, Z., Ebrahimi, M. and Kouhestani, H., 2014. The Goorgoor Fe occurrence, NE of Takab: A metamorphosed volcano-sedimentary mineralization in the Sanandaj–Sirjan zone. Advanced Applied Geology, 4(13): 20–32. (in Persian with English abstract). Retrieved June 15, 2021 from https://aag.scu.ac.ir/article_10913.html

Mohammadi Niaei, R., Daliran, F., Nezafati, N., Ghorbani, M., Sheikh Zakariaei, J. and Kouhestani, H., 2015. The Ay Qalasi deposit: An epithermal Pb–Zn (Ag) mineralization in the Urumieh-Dokhtar Volcanic Belt of northwestern Iran. Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry), 192(3): 263–274. https://doi.org/10.1127/njma/2015/0284

Mokhtari, M.A.A., 2015. Posht-e-Badam metallogenic block (Central Iran): a suitable zone for REE mineralization. Central European Geology, 58(3): 199–216. https://doi.org/10.1556/24.58.2015.3.1

Mokhtari, M.A.A., Hossein Zadeh, Gh. and Emami, M.H., 2013. Genesis of iron-apatite ores in Posht-e-Badam Block (Central Iran) using REE geochemistry. Journal of Earth System Science, 122(3): 795–807. https://doi.org/10.1007/s12040-013-0313-z

Mokhtari, M.A.A., Sadeghi, M. and Nabatian, Gh., 2018. Geochemistry and potential resource of rare earth element in the IOA deposits of Tarom area, NW Iran. Ore Geology Reveiws, 92: 529–541. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.12.006

Nabatian, Gh., 2012. Geology, Geochemistry and Evolution of Iron Oxide-apatite Deposits in the Tarom Volcano-plutonic Belt, Western Alborz. Unpublished PhD Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 375 pp. (in Persian with English abstract) Retrieved September 18, 2012 from https://parseh.modares.ac.ir/thesis.php?id=2032388&sid=1&slc_lang=en

Nabatian, Gh. and Ghaderi, M., 2014. Mineralogy and geochemistry of the rare earth elements in iron oxide-apatite deposits of the Zanjan region. Scientific Quarterly Journal, Geosciences, 24(93): 157–170. (in Persian with English abstract) http://dx.doi.org/10.22071/gsj.2014.43556

Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Corfu, F., Neubauer, F., Bernroider, M., Prokofiev, V. and Honarmand, M., 2014. Geology, alteration, age and origin of iron oxide–apatite deposits in Upper Eocene quartz monzonite, Zanjan district, NW Iran. Mineralium Deposita, 49(2): 217–234. https://doi.org/10.1007/s00126-013-0484-1

Nabatian, Gh., Ghaderi, M., Daliran, F. and Rashidnejad Omran, N., 2012. Sorkhe-Dizaj iron oxide-patite ore deposit in the Cenozoic Alborz-Azarbaijan magmatic belt, NW Iran. Resource Geology, 63(1): 42–56. https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00209.x

Najafzadeh, M., Ebrahimi, M., Mokhtari, M.A.A. and Kouhestani, H., 2017. The Arabshah occurrence: An epithermal Au-As-Sb Carlin type mineralization in the Takab-Angouran-Takht-e-Soleyman metallogenic zone, western Azerbaijan. Advanced Applied Geology, 6(4): 62–77. (in Persian with English abstract) http://doi.org/10.22055/aag.2016.12709

Nouri, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J. and Kouhestani, H., 2021. Geochemistry and petrogenesis of the Alamkandi granitoid body and Fe skarn (west of Mahneshan, Zanjan province). Journal of Economic Geology, 13(3): 507–536. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/ECONG.V13I3.86285

Pourmohamad, F., Kouhestani, H., Azimzadeh, A.M., Nabatian, Gh. and Mokhtari, M.A.A., 2019. Mianaj iron occurrence, southwest of Zanjan: Metamorphosed and deformed volcano-sedimentary type of mineralization in Sanandaj–Sirjan zone. Scientific Quarterly Journal, Geosciences, 28(111): 161–174. (in Persian with English abstract) http://doi.org/10.22071/gsj.2017.84283.1099

Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. Mienralogical Society of America, Virginia, 646 pp.

Sabzi, Z., Mokhtari, M.A.A. and Ebrahimi, M., 2018. Petrology and geochemistry of Ayoub Ansar

volcanic dome, southeast Takab. Researches in Earth Sciences, 9(1): 103–117. (in Persian with English abstract) Retrieved June 15, 2021 from https://esrj.sbu.ac.ir/article_96554.html?lang=en

Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 239 pp. http://doi.org/10.1180/minmag.1986.050.356.32

Steele-MacInnis, M., Lecumberri-Sanchez, P. and Bodnar, R.J., 2012. HOKIEFLINCS-H_2O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H_2O-NaCl. Computers and Geosciences, 49: 334–337. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.01.022

Sterner, S.M., Hall, D.L. and Bodnar, R.J., 1988. Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl-KCl-H_2O under vapor-saturated conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta 52, 989–1005. https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90254-2

Tofigi, F., Mokhtari, M.A.A., Izadyar, J. and Kouhestani, H., 2019. Geology and genesis of Halab 2 Fe occurrence in Takab-Takht-e-Soleiman-Anguoran metallogenic zone. Advanced Applied Geology, 8(1): 44–59. (in Persian with English abstract) http://doi.org/10.22055/aag.2018.22926.1747

Torab, F.M. and Lehmann, B., 2008. Magnetite-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: apatite geochemistry and monazite geochronology. Mineralogical Magazine, 71(3): 347–363. https://doi.org/10.1180/minmag.2007.071.3.347

Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1):185–187. https://doi.org/10.2138/am.2010.3371

Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Lithos, 55(1–4): 229–272. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5